



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Žaibo ir komutacinių viršįtampių oro linijose tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Ignas Jenšauskas

Projekto autorius

Doc. Roma Račkienė

Vadovė

Kaunas, 2025



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Žaibo ir komutacinių viršįtampių oro linijose tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

Ignas Jenšauskas

Projekto autorius

Doc. Roma Račkienė

Vadovė

Asist. Konstantinas Otas

Recenzentas

Kaunas, 2025



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Ignas Jenšauskas

Žaibo ir komutacinių viršįtampių oro linijose tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdamas kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasis Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs.
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalintas iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Ignas Jenšauskas

Patvirtinta elektroniniu būdu

Jenšauskas, Ignas. Žaibo ir komutacinių viršįtampių oro linijose tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovė doc. dr. Roma Račkienė; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): elektros inžinerija, inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: viršįtampiai, žaibo viršįtampiai, komutaciniai viršįtampiai, viršįtampių ribotuvai, oro linija.

Kaunas, 2025. 47 p.

Santrauka

Šiame magistro baigiamajame darbe tiriama žaibo išlydžių ir komutacijų sukeltų viršįtampių procesai 110 kV elektros perdavimo oro linijose. Apžvelgiami skirtingi viršįtampių tipai, jų poveikis elektros tinklui ir galimos apsaugos priemonės. Analizuojami viršįtampių ribotuvai – jų charakteristikos, įrengimo vietos parinkimas ir įtaka elektros perdavimo linijos įrenginių izoliacijai. Darbo objektas – aukštos įtampos 110 kV oro linija ir jos įranga, veikiama žaibo viršįtampių. Atliekamas oro linijos ir transformatorių pastotės modeliavimas elektromagnetinių pereinamųjų procesų programos (EMTP) aplinkoje. Naudojant EMTP programinį paketą imituojami žaibo smūgiai į oro liniją ir pastotę, nustatomos viršįtampių amplitudės ir trukmė skirtingomis sąlygomis. Nustatomi optimalūs viršįtampių ribotuvų parametrai ir jų įrengimo vieta pastotėje.

Jenšauskas Ignas. Investigation of Lightning and Commutation Overvoltages in Overhead Lines. Master's Final Degree Project / supervisor assoc. prof. dr. Roma Račkienė; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): electrical engineering, engineering science.

Keywords: overvoltages, lightning overvoltages, switching overvoltages, surge arresters, overhead transmission line.

Kaunas, 2025. 47.

Summary

This master's thesis investigates overvoltage processes caused by lightning discharges and switching operations in 110 kV overhead power transmission lines. Different types of overvoltages, their impact on the power grid, and potential protection devices are reviewed. Surge arresters are analyzed – their characteristics, selection of installation locations, and impact on the insulation of power transmission line equipment. The object of the study is a high-voltage 110 kV overhead line and its equipment, subjected to lightning overvoltages. Modeling of the overhead line and transformer substation is performed in the Electromagnetic Transients Program (EMTP) environment. Using the EMTP software package, lightning strikes to the overhead line and substation are simulated, determining overvoltage amplitudes and duration under different conditions. The most optimal parameters and installation location of surge arresters in the substation are determined.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų sąrašas	9
Įvadas.....	10
1. Literatūros apžvalga	11
1.1. Viršįtampiai	11
1.1.1. Viršįtampių poveikis elektros tinklui	13
1.2. Apsauga nuo viršįtampių.....	13
1.2.1. Ventiliniai iškrovikliai.....	13
1.2.2. Viršįtampių ribotuvai.....	15
1.2.3. Viršįtampių ribotuvų parametrai	16
1.2.4. Viršįtampių ribotuvų modeliai	22
1.2.5. Viršįtampių ribotuvų išdėstymas pastotėje.....	27
1.2.6. Viršįtampių ribotuvų išdėstymas oro linijoje	29
2. Metodinė dalis.....	31
2.1. Žaibo viršįtampis	31
2.2. Viršįtampių ribotuvas	33
2.3. Oro linijos atrama	34
2.4. Atramos įžeminimo varža.....	36
2.5. Transformatorių pastotė.....	36
3. Tiriamoji dalis.....	38
3.1. Tyrimas su III ir II klasės viršįtampių ribotuvais	38
3.2. Tyrimas su II klasės viršįtampių ribotuvais.....	42
Išvados	45
Literatūros sąrašas	46

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Leidžiamosios įtampos	11
2 lentelė. Viršįtampių ribotuvo (ABB EXLIM) charakteristikos	25
3 lentelė. Modelių elementų parametrai	26
4 lentelė. Viršįtampių ribotuvų modelių palyginimas	26
5 lentelė. Amplitudžių laikų palyginimas	26
6 lentelė. Viršįtampių ribotuvo (ABB EXLIM) charakteristikos	32
7 lentelė. Modelio skaičiuojamosios schemos ekvivalentinės talpos.....	37
8 lentelė. Maksimalių viršįtampių pasiskirstymas po 20 kA/1,2 μ s žaibo impulso	39
9 lentelė. Maksimalių viršįtampių pasiskirstymas po 30 kA/1,2 μ s žaibo impulso	40
10 lentelė. Maksimalių viršįtampių pasiskirstymas po 50 kA/1,2 μ s žaibo impulso	41
11 lentelė. Maksimalių viršįtampių pasiskirstymas po 100 kA/1,2 μ s žaibo impulso	42
12 lentelė. Maksimalių viršįtampių pasiskirstymas po 20 kA/1,2 μ s žaibo impulso	43
13 lentelė. Maksimalių viršįtampių pasiskirstymas po 30 kA/1,2 μ s žaibo impulso	43
14 lentelė. Maksimalių viršįtampių pasiskirstymas po 50 kA/1,2 μ s žaibo impulso	43
15 lentelė. Maksimalių viršįtampių pasiskirstymas po 100 kA/1,2 μ s žaibo impulso,.....	43

Paveikslų sąrašas

1 pav. Viršįtampių veikimo lygiai aukštosios įtampos įrenginiuose.....	12
2 pav. Ventilinio iškroviklio principinė schema: <i>Ktp</i> - kibirkštinis tarpelis, <i>Rd</i> – netiesinė varža, <i>Upr</i> – kibirkštinio tarpelio pramušimo įtampa.....	14
3 pav. Viršįtampių ribotuvo voltamperinė charakteristika.....	16
4 pav. Varistorių voltamperinės charakteristikos prie skirtingų temperatūrų: 1 – normali, 2 – padidėjusi daugiau nei 100°, 3 – daugiau nei 200°	18
5 pav. Viršįtampių ribotuvo stabilumo charakteristika	19
6 pav. II klasės 110-123 kV įtampai skirtų viršįtampių ribotuvų voltamperinės charakteristikos, 1 – $U_r=102$ kV; 2 – $U_r=108$ kV; 3 – $U_r=120$ kV; 4 – $U_r=132$ kV; 5 – $U_r=138$ kV; 6 – $U_r=144$ kV..	20
7 pav. III klasės 110-123 kV įtampai skirtų viršįtampių ribotuvų voltamperinės charakteristikos, 1 – $U_r=102$ kV; 2 – $U_r=108$ kV; 3 – $U_r=120$ kV; 4 – $U_r=132$ kV; 5 – $U_r=138$ kV; 6 – $U_r=144$ kV; 7 – $U_r=150$ kV; 8 – $U_r=162$ kV	21
8 pav. Skirtingų klasių 110-123 kV įtampai skirtų viršįtampių ribotuvų su $U_c=78$ kV ir $U_r=120$ kV voltamperinės charakteristikos, 1 – IV klasės; 2 – III klasės; 3 – II klasės;.....	21
9 pav. Ekvivalentinė schema, paremta IEEE viršįtampių ribotuvo modeliu	22
10 pav. Supaprastinta viršįtampių ribotuvo modelio ekvivalentinė schema.....	22
11 pav. Viršįtampių ribotuvo modelis su induktyvumu.....	24
12 pav. Viršįtampių ribotuvo modelis su netiesiniu induktyvumu	24
13 pav. IEEE pagrindu sukurtas supaprastintas viršįtampių ribotuvo modelis.....	24
14 pav. Supaprastintas IEEE viršįtampių ribotuvo modelis be talpinio elemento	25
15 pav. Supaprastintas IEEE viršįtampių ribotuvo modelis	25
16 pav. Modelių į bangos formos $8 \times 20 \mu s$ su 10 kA	26
17 pav. Modelių bangos $1 \times 2 \mu s$ su 10 kA formų palyginimas.....	27
18 pav. Viršįtampių ribotuvų taikymas linijų įvaduose ir šynose, prie kurių prijungti viršįtampiams jautrūs įrenginiai, esantys toliau nei 30 m	28
19 pav. Viršįtampių ribotuvų išdėstymo principinės schemos.....	29
20 pav. Viršįtampiai su ir be viršįtampių ribotuvų	30
21 pav. Žaibo išlydžio dvigubos rampos bangos forma.....	31
22 pav CIGRE žaibo išlydžio bangos forma.....	31
23 pav CIGRE modelio žaibo impulso konfigūracija EMTP aplinkoje	33
24 pav ZnO ribotuvo schemas supaprastinimas pagal IEEE modelį	33
25 pav Oro linijos atramos geometrinis modelis banginei varžai nustatyti	34
26 pav Tipinės 110 kV tarpinės atramos realizavimas EMTP modelyje	35
27 pav. Supaprastintos perdavimo linijos ir pastotės skirtingų modelių konfigūracijos	38
28 pav. 20 kA/1,2 μs žaibo impulsas skirstyklos įvade	39
29 pav. 30 kA/1,2 μs žaibo impulsas skirstyklos įvade	40
30 pav. 50 kA/1,2 μs žaibo impulsas skirstyklos įvade	41
31 pav. 100 kA/1,2 μs žaibo impulsas skirstyklos įvade	42

Santrumpų sąrašas

EMTP - elektromagnetinių pereinamųjų procesų programa (angl. *electromagnetic transients program*);

OL – oro linija;

TP – transformatorių pastotė;

AKĮ - automatinis kartotinis įjungimas;

TOV – trumpalaikis viršįtampis (angl. *temporary over-voltages*);

ATP – alternatyvioji pereinamųjų procesų programa (angl. *alternative transients program*);

PSO – perdavimo skirstymo operatorius;

BIL - žaibo impulsinės izoliacijos lygis;

MT – matavimo transformatorius;

GT – galios transformatorius.

Įvadas

Šiuolaikinės elektros energetikos sistemoje vienas svarbiausių patikimumo veiksnių yra viršįtampiai. Ypač pavojingi yra atmosferiniai (žaibo) viršįtampiai – jų amplitudės gali kelis kartus viršyti nominalią tinklo įtampą, dėl ko kyla didelė elektros įrenginių izoliacijos sugedimo ir avarių rizika. Ne mažiau aktualūs yra ir komutaciniai (vidiniai) viršįtampiai, kylantys jungiant elektros tinklo elementus. Siekiant išvengti neigiamo komutacinių viršįtampių poveikio, būtina juos nuodugniai tirti. Aukštos įtampos perdavimo tinkluose (110 kV) patikima oro linijų apsauga nuo viršįtampių yra kritiškai svarbi siekiant užtikrinti nepertraukiamą elektros energijos tiekimą ir įrangos saugumą. Dėl šių priežasčių viršįtampių procesų oro linijose analizė išlieka aktuali mokslo ir inžinerijos problema.

Apsaugai nuo viršįtampių elektros energetikos sistemoje taikyti įvairūs įrenginiai. Šių priemonių charakteristikos yra gana skirtingos. Net viršįtampių ribotuvų įrengtų elektros tinklo įvairiose vietose voltamperinės charakteristikos yra skirtingos. Daugelių atvejų elektros tinkle gali būti įrengtos įvairių tipų apsaugos priemonės nuo viršįtampių t.y. ventiliniai iškrovikliai, viršįtampių ribotuvai, kameriniai iškrovikliai. Apsaugos priemonių efektyvumą lemia ne tik jų voltamperinė charakteristika, bet ir vieta kurioje jie įrengti bei jų suderinimas ir įrengimo vieta. Norint įvertinti veikiančių viršįtampių lygį oro linijos ir skirstyklos įrenginių izoliacijai, turi būti sudarytas oro linijos ir skirstykla modelis bei atlikti viršįtampių pasiskirstymo skaičiavimai. Be to, modeliuojant viršįtampių pereinamuosius vyksmus, būtina įvertinti viršįtampių ribotuvų darbo sąlygas, sroves ir energetinės gebos parametrus.

Šiame magistro baigiamajame darbe tiriami žaibo išlydžių ir komutacijų sukeltų viršįtampių procesai 110 kV elektros perdavimo oro linijose. Darbo objektas – aukštos įtampos 110 kV oro linija ir jos įranga, veikianti žaibo viršįtampių. Tyrime taip pat analizuojami viršįtampių ribotuvai – jų charakteristikos, įrengimo vietos parinkimas ir įtaka elektros perdavimo linijos įrenginių izoliacijos apsaugai. Tyrimo metodai apima mokslinės literatūros analizę, matematinio oro linijos ir transformatorių pastotės modelio sukūrimą ir skaitmeninį modeliavimą elektromagnetinių pereinamųjų procesų programos (EMTP) aplinkoje. EMTP modeliavimas leidžia imituoti žaibo smūgius į oro liniją ar pastotę, siekiant nustatyti viršįtampių amplitudes, trukmę ir kitus parametrus skirtingomis sąlygomis.

Baigiamojo darbo tikslas – ištirti aukštosios įtampos elektros sistemoje galimus didžiausius viršįtampius veikiančius skirstyklos įrenginių ir oro linijų izoliaciją, nustatyti optimalią apsaugos priemonių vietą skirstykloje ir įvertinti jų darbo sąlygas.

Uždaviniai:

1. ištirti žaibo viršįtampių oro linijoje ir skirstykloje charakteristikas;
2. sukurti oro linijos ir skirstyklos matematinį modelį;
3. nustatyti optimalias viršįtampių ribotuvų įrengimo vietas;
4. nustatyti optimalius viršįtampių ribotuvų parametrus.

1. Literatūros apžvalga

1.1. Viršįtampiai

Viršįtampiu elektros tinkle vadinamas įtampos padidėjimas virš didžiausios leistinos tinklo įtampos, atsirandantis dėl įvairių priežasčių. Pagal kilmę viršįtampiai skirstomi į vidinius (sukeltus pačios sistemos procesu) ir išorinius (sukeltus išorinių veiksnių, dažniausiai žaibo). Tarptautiniame IEC 60071-1 standarte analogiškai išskiriamos trys pagrindinės viršįtampių kategorijos:

1. Žaibo viršįtampiai - išorinės kilmės viršįtampiai, atsirandantys dėl žaibo išlydžių poveikio elektros tinklui. Jiems būdingos ypač didelės amplitudės ir labai trumpa trukmė, įprastai tai yra stataus fronto viršįtampis, trunkantis kelias dešimtis ar šimtąsias mikrosekundes. Žaibo sukeltas viršįtampis pasižymi itin statoku bangos frontu ir gali pasiekti šimtų kilovoltų dydį. Dėl šių priežasčių žaibo viršįtampiai laikomi pačiais pavojingiausiais elektros tinklui, nors jie trunka labai trumpai, jų momentinė įtampa gali smarkiai viršyti įrenginių izoliacijos ribinius lygius.
2. Komutaciniai viršįtampiai - vidinės kilmės viršįtampiai, atsirandantys vykdant komutacijas elektros tinkle – pavyzdžiui, įjungiant ar išjungiant elektros perdavimo linijas, kabelius, transformatorius, jungiant kompensavimo įrenginius. Šios kategorijos viršįtampiai, lyginant su žaibo sukeltais viršįtampiais, pasižymi nuožulnesniu frontu ir kiek ilgesne trukme. Fronto trukmė gali siekti dešimtis ar net šimtus mikrosekundžių.
3. Trumpalaikiai viršįtampiai - ilgiau trunkantys viršįtampiai, kurių dažnis artimas tinklo dažniui. Jie gali tęstis nuo kelių periodų iki kelių sekundžių ar net minučių, kol pašalinama priežastis. Laikinuosius viršįtampius dažniausiai sukelia sistemos gedimai ar nestabilumai: vienfaziai įžemėjimai, ferorezonansai, staigūs režimo pokyčiai, pavyzdžiui, apkrovos atjungimas (kai ilgos linijos gale dėl Ferranti efekto įtampa pakyla virš normos). Šių viršįtampių amplitudė paprastai yra nedaug didesnė už darbinę įtampą – dažniausiai apie 1,1–1,5 karto virš nominalios įtampos – tačiau tam tikrais atvejais gali siekti ir 1,73 s.v.

Elektros įrenginių izoliacija turi būti atspari tiek viršįtampiams, tiek ilgalaikiam poveikiui maksimalia leistina darbine įtampa [1]. Kiekvienam įrenginiui nustatytos tinkamos tinklo įtampos ribos, kurios pateiktos 1 lentelėje. Didžiausios leistina įtampos viršutinė riba priklauso nuo įtampos lygio: 3–20 kV linijoms – iki 20 %, 35–220 kV – iki 15 %, 330 kV – iki 10 %, o 500 kV – iki 5 %.

1 lentelė. Leidžiamosios įtampos

Nominalioji įtampa, kV	6	10	35	110	150	220	330	500
Didžiausia leidžiamoji įtampa, s.v.	1,2	1,2	1,15	1,15	1,15	1,15	1,10	1,05

Viršįtampiai susidaro pereinamojo proceso metu, kai įtampa viršija leistiną darbinę įtampą (U_{md}). Toks įtampos šuolis ir vadinamas viršįtampiu. Jie skirstomi pagal poveikio vietą:

- fazinius – veikia izoliaciją tarp fazės ir žemės,
- tarpfazinius – veikia izoliaciją tarp skirtingų fazių,
- tarpvijinius – veikia vijų izoliaciją,
- tarp kontaktų – veikia atjungiamųjų ar atjungtųjų aparatų izoliaciją tarp kontaktų.

Viršįtampių poveikis izoliacijai apibūdinamas šiais parametrais: didžiausia viršįtampio reikšmė, smūginis koeficientas, kuris apskaičiuojamas pagal 1 formulę, poveikio trukmė, pereinamojo proceso kreivės forma bei veikimo zona.

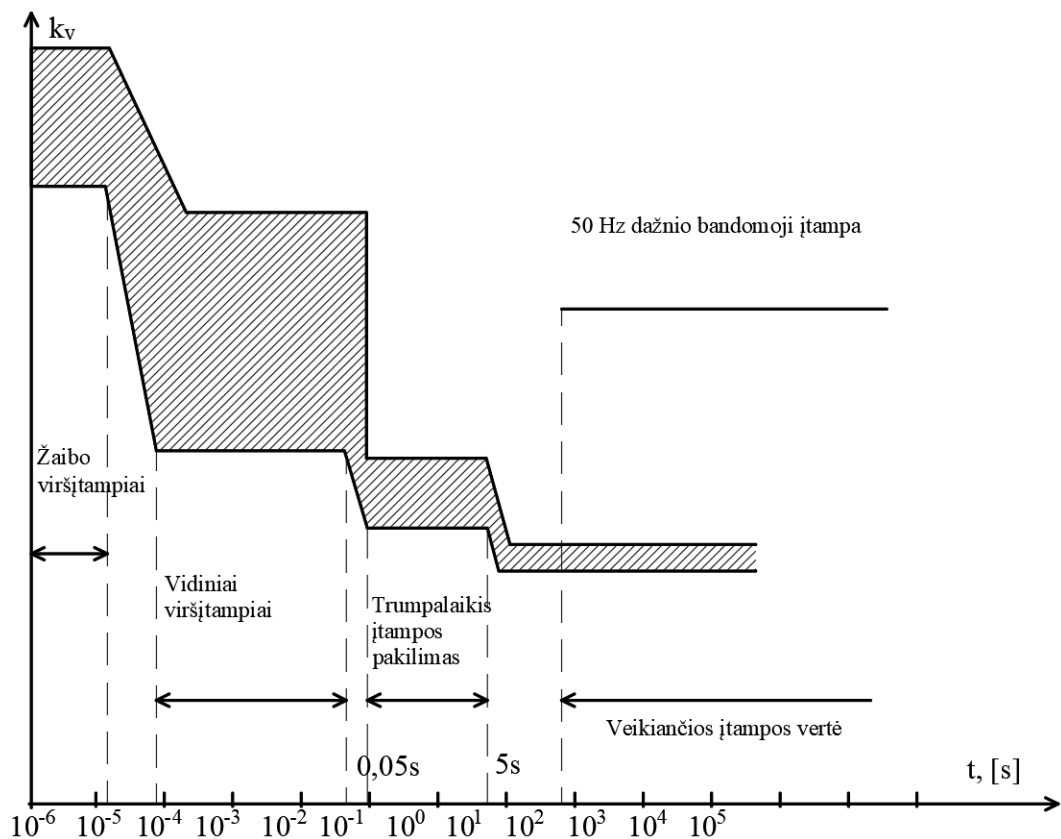
$$k_v = \frac{U_m}{U_{md}}; \quad (1)$$

čia: k_v – smūginis koeficientas;

U_m – maksimali amplitudė;

U_{md} – didžiausia leistina darbinė įtampa, kV.

Dėl įvairių perjungimų ar išorinių veiksnių elektros tinkle pereinamojo proceso metu įtampa gali viršyti leistiną darbinę ribą. Toks įtampos padidėjimas, vadinamas viršįtampiu, kelia grėsmę įrenginių izoliacijos patikimumui. Viršįtampių intensyvumas priklauso nuo jų atsiradimo priežasčių ir veikimo trukmės, kurios pavaizduotos 1 paveiksle.



1 pav. Viršįtampių veikimo lygiai aukštosios įtampos įrenginiuose

Viršįtampių pereinamieji procesai elektros tinkluose gali kilti dėl įvairių procesų, tokių kaip linijų įjungimas ar išjungimas, trumpojo jungimo atjungimas, rezonansinių reiškinių, ferorezonansų. Šių viršįtampių dydis priklauso nuo elektros linijų ilgio, jų išdėstymo, konstrukcinių ypatybių, apkrovos bei įtampos lygio tinkle.

Maksimalūs viršįtampiai gali būti nustatomi atliekant matavimus specialiais registravimo prietaisais arba taikant skaitinius modeliavimus, kurie imituoja pereinamuosius procesus esant skirtingoms tinklo darbo sąlygoms [3].

Įrenginių izoliacijos atsparumas įvertinamas pagal 1 minutės trukmės 50 Hz dažnio bandymo įtampą, taip pat visos ir trumposios bangos impulsinę įtampą. Kai kuriais atvejais viršįtampiai 110 kV ir aukštesnės įtampos tinkluose gali viršyti šias bandomąsias vertes.

Renkantis viršįtampių apsaugos priemones arba nustatant izoliacijos lygį aukštosios įtampos linijoms (virš 110 kV), itin svarbu atsižvelgti į viršįtampius, susidarančius linijų įjungimo metu. Dažniausios situacijos – tai elektros linijos įjungimas be apkrovos arba pakartotinis įjungimas po automatinio kartotinio įjungimo (AKI) pertraukos.

1.1.1. Viršįtampių poveikis elektros tinklui

Viršįtampiai gali sukelti tiesioginius elektros įrenginių izoliacijos gedimus. Kai viršįtampio amplitudė viršija įrenginio izoliacijos dielektrinę stiprumo ribą, įvyksta izoliacijos pramušimas arba pramušimas įrenginio viduje. Ypač pavojingi yra žaibo sukeliami impulsai – dėl itin staigaus įtampos pakilimo ir didelės amplitudės jie apkrauna izoliaciją smūginiu poveikiu. [4] Kuo statesnis viršįtampio bangos frontas, tuo netolygiau pasiskirsto įtampa izoliacijoje. Dėl šios priežasties atsiranda lokalių perkrovų ir vietinių izoliacijos pažeidimų. Pasikartojantys viršįtampiai silpnina izoliacijos medžiagas, paspartina senėjimą ir mažina įrenginių ilgaamžiškumą.

Dėl izoliacijos pažeidimų ir įrangos sutrikimų viršįtampiai tiesiogiai veikia elektros tiekimo patikimumą. Kiekvienas izoliacijos pramušimas ar apsaugos suveikimas reiškia neplanuotą elektros tiekimo nutrūkimą vartotojams. Žaibo sukelti sutrikimai statistiškai sudaro reikšmingą dalį visų tinklo avarių. Įvairių šalių duomenimis, žaibas yra viena dažniausių perdavimo linijų gedimų priežasčių. Atlikus aukštos įtampos linijų gedimų analizę nustatyta, kad daugiau nei 45 % visų perdavimo linijų atjungimų sukelia žaibo sukelti viršįtampiai. Kituose regionuose fiksuojama, jog apie 20 % visų elektros energijos tiekimo nutrūkimų galima tiesiogiai sieti su žaibo smūgiais ir jų sukeltais viršįtampiais [5]. Tai reiškia, kad beveik kas antra neplaninė aukštos įtampos linijos avarija gali būti susijusi su atmosferiniais viršįtampiais. Šie sutrikimai ne tik nutraukia elektros tiekimą, bet ir gali pažeisti tinklo elementus, kuriuos tenka keisti ar remontuoti.

Nors komutaciniai ir laikini viršįtampiai rečiau sukelia staigius avarinius atsijungimus, jie taip pat veikia patikimumą. Trumpalaikiu įtampos pakilimo metu, kai tinklo įtampa pakilusi ilgesnį laiką, suveikia apsaugos įrenginiai atjungdami tam tikrus įrenginius siekiant apsaugoti juos nuo perkrovos. Pavyzdžiui, jeigu įtampa viršija ~1.5 s.v. ir tęsiasi ilgiau nei keletą sekundžių, apsaugos sistema paprastai atjungs paveiktą sekciją arba transformatorių, kad išvengtų šiluminių pažeidimų. Toks apsaugos veikimas, nors apsaugo įrangą, sukelia tinklo struktūros persijungimą ar net tiekimo nutrūkimą. Be to, ilgesni viršįtampiai smarkiai apkrauna viršįtampių ribotuvus, kurie skirti sugerti trumpus impulsus, todėl užsitęsęs viršįtampis gali juos perkaitinti. Sugedęs ribotuvus faktiškai sukelia trumpąjį jungimą į žemę, kol grandinė būna atjungta nuo įtampos.

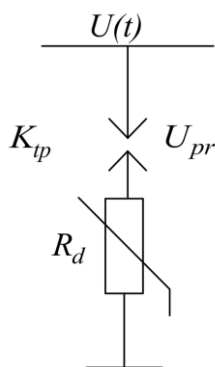
1.2. Apsauga nuo viršįtampių

1.2.1. Ventiliniai iškrovikliai

Ventiliniai iškrovikliai yra viena iš tradicinių apsaugos nuo viršįtampių priemonių naudojamų aukštosios įtampos elektros tinkluose, ypač pastotėse. Šie įtaisai skirti saugoti elektros įrenginių izoliaciją nuo atmosferinių ir vidinių viršįtampių. Taip pat 330 kV ir aukštesnės įtampos tinkluose

gali būti taikomi kombinuotieji ventiliniai iškrovikliai, kurie užtikrina ir papildomą apsaugą nuo komutacinių viršįtampių. [2]

Struktūriškai ventilinį iškroviklį sudaro kibirkštinis tarpas ir nuosekliai sujungta varža, turinti netiesinę voltamperinę charakteristiką. Principinė ventilinio iškroviklio schema pateikta 2 pav.



2 pav. Ventilinio iškroviklio principinė schema: K_{tp} - kibirkštinis tarpelis, R_d – netiesinė varža, U_{pr} – kibirkštinio tarpelio pramušimo įtampa

Veikimo principas pagrįstas tuo, kad įtampai viršijus kibirkštinio tarpelio pramušimo įtampą U_{pr} , tarpas pramušamas ir per jį pradeda tekėti srovė. Tokiu atveju į tinklo grandinę lygiagrečiai įsijungia iškroviklio varža, kurios laidumas priklauso nuo įtampos dydžio – didėjant įtampai, varža mažėja, o mažėjant – didėja. Šio proceso metu dalis viršįtampos energijos išsklaidoma šilumos pavidalu varžoje, taip sumažinant viršįtampos įtaką saugomai įrangai. Susidaręs įtampos kritimas varžoje vadinamas liekamąja įtampa. Dėl netiesinės varžos savybių, ši liekamoji įtampa paprastai būna žemesnė nei įrangos impulsinė laikomoji įtampa, todėl įranga yra efektyviai apsaugoma nuo izoliacijos pramušimo.

Kai per iškroviklį tekanti srovė pasiekia nulį, kibirkštinis lankas tarpelyje užgęsta, o tarpelio dielektrinės savybės atsistato į pradinę būseną. Esant įprastinėms tinklo sąlygoms, kai įtampa nebeviršija U_m , iškroviklis išlieka neveiklus, taip išvengiant bereikalingo įsijungimo.

Ventiliniai iškrovikliai yra taikomi elektros tinkluose, kurių įtampa neviršija 110 kV, ir naudojami išimtinai elektros įrenginių izoliacijai apsaugoti nuo atmosferinių viršįtampių poveikio. Tuo tarpu 150 kV ir aukštesnės įtampos sistemose izoliacijos elektrinis stipris yra mažesnis nei galimi viršįtampių lygiai, todėl tokiuose tinkluose diegiami pažangesni, geresnių charakteristikų kombinuotieji (magnetiniai) ventiliniai iškrovikliai, kurie užtikrina apsaugą tiek nuo atmosferinių, tiek nuo komutacinių viršįtampių. [6]

Ventiliniams iškrovikliams būdinga keletas pagrindinių parametrų: vardinė įtampa, liekamoji įtampa, didžiausia leistina įtampa, kibirkštinio tarpo pramušimo įtampa, impulsinė pramušimo įtampa, bei impulsinės srovės bandymo metu (2–20 μ s trukmės) nustatytos įtampos reikšmės. Liekamoji įtampa paprastai nustatoma prie standartizuotų impulsinių srovių amplitudžių – nuo 3000 A iki 20000 A.

Ventilinių iškroviklių apsaugos efektyvumas priklauso nuo jų derinimo su saugomų elektros įrenginių izoliacijos savybėmis. Derinimas reiškia tinkamą izoliacijos elektrinio stiprio ir ribotuvo liekamosios įtampos santykio parinkimą. Kibirkštinio tarpelio pramušimo įtampa turi būti žymiai žemesnė už saugomos izoliacijos impulsinę bandymo įtampą. Taip pat ribotuvo liekamoji įtampa, esant

konkrečiai impulsinei srovei, neturi viršyti įrenginio izoliacijos bandymui taikomos įtampos. Kitaip tariant, impulsinės bandymo įtampos vertės derinamos pagal iškroviklio liekamosios įtampos reikšmes, kad būtų užtikrintas efektyvus izoliacijos apsaugos lygis.

Remiantis šiais parametrais galima nustatyti ventilinio iškroviklio veiksmingos apsaugos zoną. Pavyzdžiui, iškroviklis, įrengtas transformatoriaus pusėje, gali apsaugoti ne tik patį transformatorių, bet ir kitus šalia esančius skirstyklos įrenginius, kurių izoliacijos bandymo įtampos yra aukštesnės. Praktikoje tokios apsaugos zona gali siekti iki 130 metrų nuo iškroviklio įrengimo vietos.

1.2.2. Viršįtampių ribotuvai

Cinko oksido pagrindu sukurti viršįtampių ribotuvai pradėti plačiai taikyti po 1970 metų, kai buvo ištobulinta šio puslaidininkio polikristalinė struktūra. Šio tipo ribotuvų pagrindinis aktyvus elementas – cinko oksido (ZnO) varistorius, kuris pasižymi netiesiškesne voltamperine charakteristika, lyginant su anksčiau naudotomis karborundinėmis (SiC) varžomis, taikytomis ventiliiniuose iškrovikliuose [7]. Nominaliomis tinklo sąlygomis per viršįtampių ribotuvą teka tik labai silpna, miliamperinio lygmens srovė. Svarbiausios cinko oksido viršįtampių ribotuvų techninės charakteristikos yra šios:

- liekamoji įtampa (t. y. viršįtampio lygis ribotuvui praleidžiant nominalią impulsinę srovę);
- ilgalaikė leistinoji darbinė įtampa (U_c)
- santykinė energija, išreiškianti ribotuvo sugebėjimą absorbuoti viršįtampio energiją jam ribojant impulsus. Santykinė energija apskaičiuojama:

$$E_* = \frac{E}{U_c}; \quad (2)$$

čia: E_* – santykinė energija, kJ/kV;

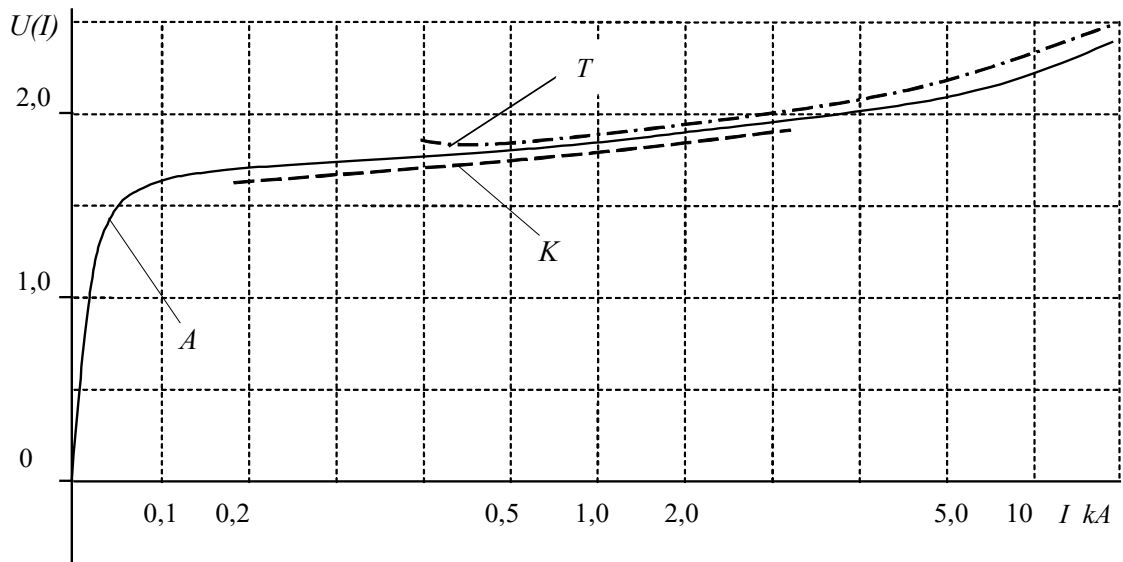
U_c – ilgalaikė leistinoji darbinė įtampa, kV;

E – absorbuota energija, kJ.

Viršįtampių ribotuvų efektyvumas apsaugant elektros įrenginių izoliaciją priklauso nuo daugelio veiksnių: linijų apsaugos nuo žaibo veiksmingumo, tinklo elektromagnetinių parametru, ribotuvų išdėstymo, jų techninės būklės bei apsauginių charakteristikų suderinamumo su saugomos įrangos savybėmis.

Cinko oksido ribotuvai yra plačiai naudojami tiek nuo atmosferinių, tiek nuo komutacinių viršįtampių apsisaugoti izoliuotos, įžemintos ar kompensuotos neutralės tinkluose. Šie įrenginiai į tinklą jungiami tiesiogiai, be jokio kibirkštinio tarpo. Normalaus darbo režimu ribotuvai išlieka neveiklūs – per juos praktiškai neteka srovė. Atsiradus viršįtampiams per ribotuvą srovė didėja palaipsniui, be staigių šuolių, kas būdinga iškrovikliams, todėl pereinamasis procesas tinkluose yra švelnesnis, nors ir su siauresne apsaugos zona. [8] Viršįtampių ribotuvų voltamperinės charakteristikos priklauso nuo viršįtampio pobūdžio ir yra klasifikuojamos į kelis lygius, kaip pavaizduota 3 pav.:

- A lygis – izoliacijos veikia veikiant pilnai atmosferinio impulso bangai,
- K lygis – pereinamieji reiškiniai, kylantys dėl komutacinių viršįtampių,
- T lygis – trumpi, labai staigaus fronto impulsai ($1/4 \mu s$), susidarantys, pavyzdžiui, įsijungus kibirkštiniam iškrovikliui.



3 pav. Viršįtampių ribotuvo voltamperinė charakteristika

1.2.3. Viršįtampių ribotuvų parametrai

Viršįtampių ribotuvai apibūdinami šiais parametrais:

- U_{md} – ilgalaike maksimalia darbine įtampa tinkle, kV;
- U_c – ilgalaike maksimalia ribotuvo darbine įtampa, kV (parenkant laikantis sąlygos: $U_c > U_{md}$);
- U_p – liekamąja įtampa (kV), kai teka didžiausia impulsinė srovė (8/20);
- U_{ps} – liekamąja įtampa (kV), kai teka komutacinio pobūdžio impulsas (30/70);
- W – ribotuvo absorbuojamos energijos kiekiu, kJ.

Viršįtampių ribotuvų terminės savybės, susijusias su ilgalaičių pereinamųjų procesų metu generuojama šiluma, apibrėžia jų vardinė efektinė įtampa U_r . Šis parametras nurodo įtampos lygį, prie kurio ribotuvai išlieka termiškai stabilūs.

Viršįtampių ribotuvo absorbuojamos energijos kiekis yra esminis rodiklis, kuris nusako įrenginio gebėjimą efektyviai slopinti viršįtampių metu perduodamą energiją [9]. Šis dydis lemia ribotuvo techninę klasę ir yra vienas iš pagrindinių parinkimo kriterijų. Viršįtampių ribotuvų energijos absorbcijos geba išreiškiama santykiu:

$$W = \frac{W_r}{U_r}; \quad (3)$$

čia: W – santykinė absorbuojama energija, kJ/kV;

W_r – bendras ribotuvo absorbuojamos energijos kiekis, kJ,

E – vardinė darbinė įtampa, kV.

Parenkant konkretų viršįtampių ribotuvą būtina užtikrinti, kad viršįtampio poveikio vietoje suskaičiuotas energijos kiekis W_{sk} būtų mažesnis nei pasirinkto ribotuvo klasės leistinas energijos kiekis: ($W_r < W_{sk}$).

Pagrindinis viršįtampių ribotuvų taikymo tikslas yra sumažinti atmosferinės arba komutacinės kilmės viršįtampių amplitudes iki lygių, kuriuos gali atlaikyti įrenginių izoliacija. Kuo žemesnė ribotuvo liekamoji įtampa, tuo labiau slopinamas viršįtampis, tačiau tuo pačiu padidėja reikalavimai ribotuvo energinėms savybėms. Tokiu atveju ribotuvui tenka didesnė energinė apkrova, todėl būtina, kad jo absorbuojama energija būtų pakankamai didelė.

Viršįtampių ribotuvai yra tikrinami pagal TOV (angl. *Temporary Over-Voltages*) bandymo procedūras, kuriomis nustatomas jų leistinos maksimalios įtampos vertės. Šio tipo bandymuose įrenginys veikiamas srove, kurios dydis siekia 50 mA, o trukmė – 1 sekundė ir 10 sekundžių [10]. Viršijus gamintojo nustatytą leistiną TOV įtampos vertę, ribotuvo netiesinė varža gali perkaisti, dėl ko persislenka jo voltamperinė charakteristika (žr. 4 pav.). Ribotuvo terminis stabilumas užtikrinamas tuo atveju, jei bendra sugerta energija per viršįtampio veikimo laiką neviršija šios išraiškos:

$$A_T = U_r \cdot I \cdot t ; \quad (4)$$

čia: A_T – absorbuota šiluminė energija, kJ;

U_r – ribotuvo vardinė darbinė įtampa, kV;

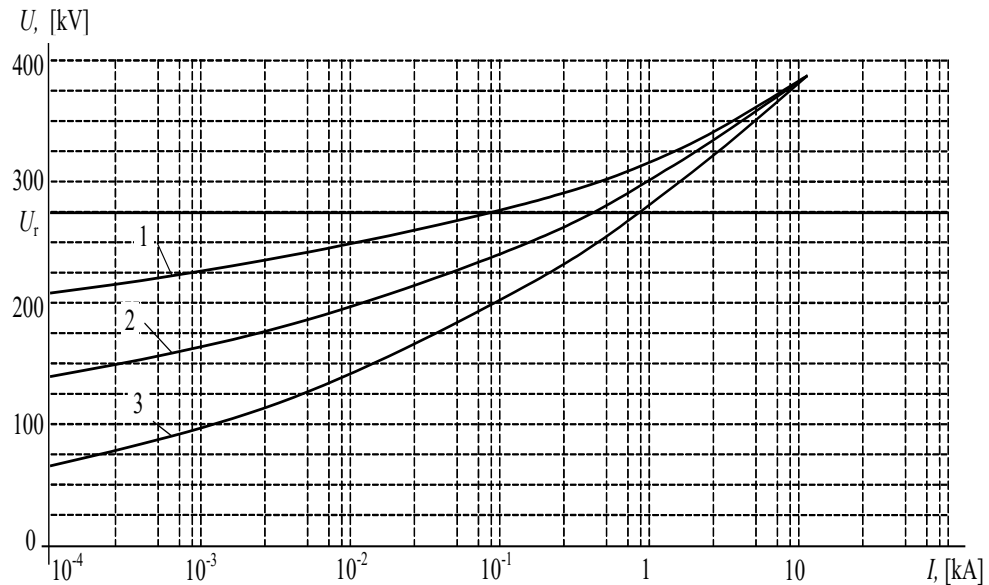
I – bandomoji srovė, A;

t – veikimo trukmė, s.

Įkaitęs viršįtampių ribotuvas tokį energijos kiekį išspinduliuoja į aplinką per gana ilgą laiką – dažniausiai tai trunka dešimtis minučių. Ribotuvo savybės visiškai atsistato tik tada, kai jo temperatūra nukrenta iki maždaug 40 °C – tik tuomet gamintojai garantuoja pradinio lygio apsaugos efektyvumą ir liekamąją įtampą.

Tyrimai rodo, kad varistorių voltamperinė charakteristika žemo srovės intensyvumo srityje yra ypač jautri temperatūros pokyčiams: esant 100 °C temperatūros padidėjimui, pradinė srovė gali padidėti net 10–100 kartų. Dėl šios priežasties TOV testai atliekami tik vieną kartą, šaltam ribotuvui, 10 sekundžių trukmei – tai leidžia įvertinti ribotuvo reakciją į pirmąjį viršįtampio impulsą.

Didėjant ribotuvo temperatūrai, keičiasi voltamperinės charakteristikos pradinis segmentas – prie žemesnės įtampos gali tekėti didesnė srovė (4 pav.), o tai daro įtaką ir pereinamųjų procesų eigai tinkle [11]. Todėl projektuojant apsaugos sistemą vietose, kur tikėtinas dažnas viršįtampių pasikartojimas, būtina atsižvelgti į galimą ribotuvo perkaitimą ir, jei reikia, parinkti aukštesnę leidžiamą ilgalaikę darbinę įtampą. Ši riba gali būti nustatoma atliekant tinklo pereinamųjų procesų modeliavimą skaitiniais metodais.



4 pav. Varistorių voltamperinės charakteristikos prie skirtingų temperatūrų: 1 – normali, 2 – padidėjusi daugiau nei 100°, 3 – daugiau nei 200°

Viršįtampių ribotuvų voltamperinės charakteristikos pokyčiai, atsirandantys dėl varistoriaus išilimo, tiesiogiai veikia įrenginio veikimo stabilumą, ypač esant dažnai pasikartojantiems ilgalaikiams pereinamiesiems viršįtampiams elektros tinkle. Šiluminis poveikis modifikuoja varistoriaus laidumą – esant tam pačiam įtampos lygiui, išilęs ribotuvas praleidžia didesnę srovę nei šaltas.

Viršįtampių ribotuvų voltamperinės charakteristikos priklauso nuo kelių esminių parametru: ilgalaikės leistinos darbinės įtampos U_c , vardinės įtampos U_r bei įrenginio priskirtos energijos absorbcijos klasės. Šie parametrai lemia, kaip ribotuvas reaguos į viršįtampius skirtingomis tinklo darbo sąlygomis.

Siekiant pagrįstai parinkti viršįtampių ribotuvo parametrus ir optimizuoti jų išdėstymą tinkle, būtina atlikti skaitinius modeliavimus [12]. Tokie skaičiavimai apima žaibo išlydžių ir komutacinių procesų sukeltus pereinamuosius reiškinius. Jie leidžia nustatyti tikėtinius viršįtampių lygius bei ribotuvo srovinius parametrus, o tai būtina siekiant užtikrinti stabilų ir patikimą ribotuvo veikimą konkrečioje vietoje.

Pagrindinis viršįtampių ribotuvo patikimumo rodiklis yra jo stabilumo charakteristika, kuri įvertinama taikant stabilumo koeficientą:

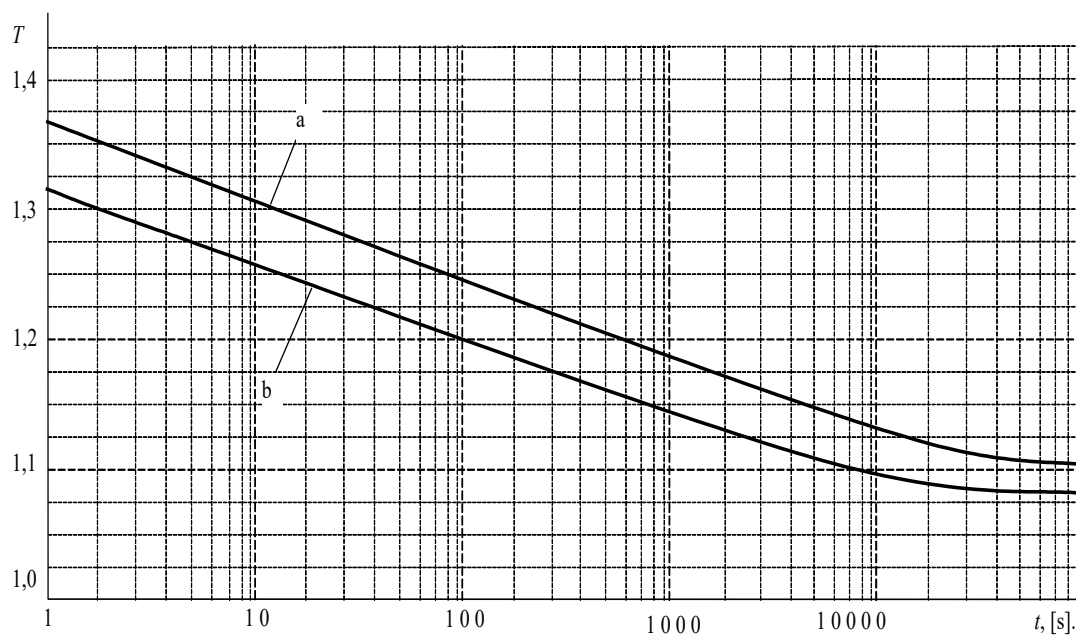
$$T = \frac{U_{TOV}}{U_c} \tag{5}$$

čia: T – viršįtampių ribotuvo stabilumo koeficientas;

U_{TOV} – įtampa viršijanti U_c , pagal jos dydį vertinama kiek laiko viršįtampių ribotuvas išlieka stabilus, kV;

U_c – ilgalaikė leistina darbinė įtampa, kV;

Šis koeficientas parodo, kiek kartų laikinai gali būti viršyta darbinė įtampa, kol ribotuvas dar išlieka termiškai stabilus. Stabilumo kreivės (5 pav.) vaizduoja priklausomybę tarp leistinos įtampos padidėjimo ir veikimo trukmės – t. y., kiek laiko ribotuvas gali atlaikyti tam tikrą viršįtampį neprarasdamas savo funkcionalumo. Stabilumo charakteristiką apibūdina pateiktos dvi pagrindinės kreivės $T = f(t)$. Pradinį stabilumą šaltam, neįkaitusiam ribotuvui apibūdina a kreivė, o b kreivė apibūdina stabilumo lygį po to, kai ribotuvas buvo paveiktas 100 kA 4/10 formos impulsu, kai aplinkos temperatūra siekia 60 °C. Projektuojant apsaugą nuo viršįtampių, būtina įvertinti ribotuvių stabilumą pagal realias tinklo eksploatavimo sąlygas ir numatytus maksimalios įtampos scenarijus.



5 pav. Viršįtampių ribotuvo stabilumo charakteristika

TOV bandymų rezultatai leidžia ekstrapoliuoti ribines įtampų vertes ilgesniems ar trumpesniems laikotarpiais laiko skalėje. Siekiant išvengti ribotuvo perkaitimo, būtina tinkamai parinkti tiek U_r , tiek U_c reikšmes, kad komutacinio viršįtampio metu įtampa neviršytų nustatytos ribos, apibrėžtos per terminio stabilumo faktorių k_{TOV} .

Praktiniam parinkimui dažnai remiamasi prielaida, kad komutacinio viršįtampio amplitudė atitinka įrangos izoliacijos bandymo įtampą, turinčią pramoninio dažnio ketvirčio periodo trukmę. Tuomet ribotuvo įtampos dydžiai skaičiuojami taip:

$$U_r = \frac{U_B}{k_{TOV, 0,005}}; \quad (6)$$

$$U_c \approx 0,8 \cdot U_r; \quad (7)$$

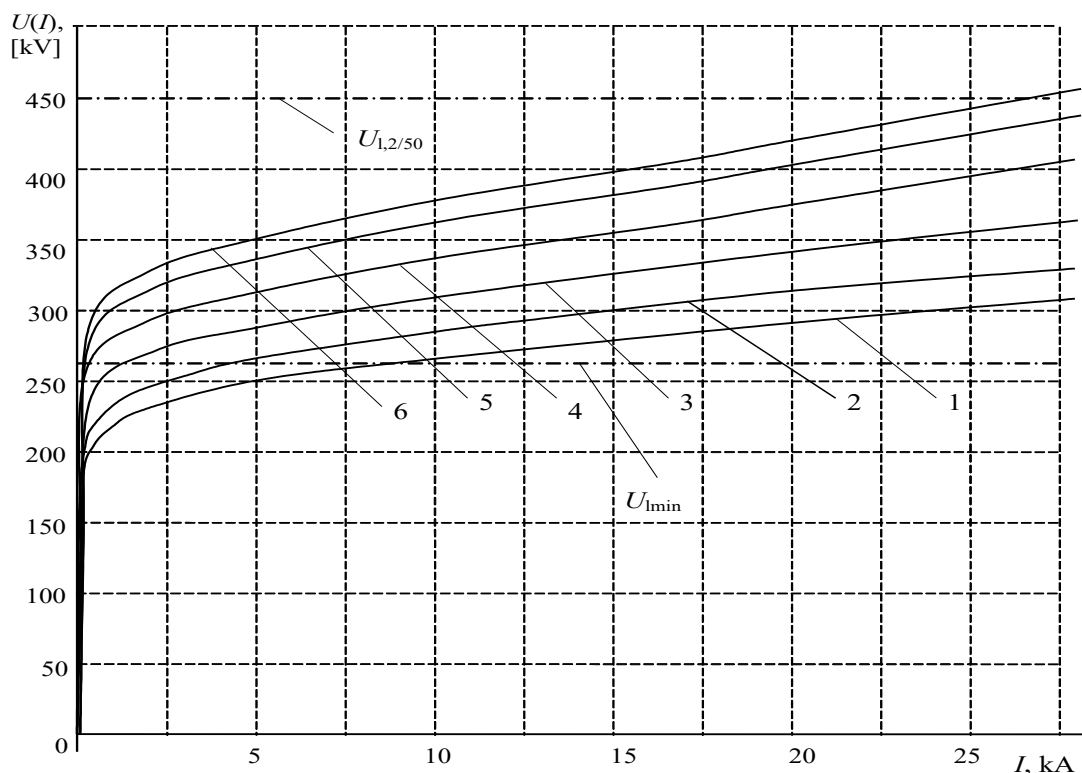
čia: U_r – vardinė darbinė ribotuvo įtampa, kV;

U_c – ilgalaikė leistina darbinė įtampa, kV;

U_B – izoliacijos bandymo įtampa, kV;

$k_{TOV\ 0,005}$ – terminio stabilumo koeficientas.

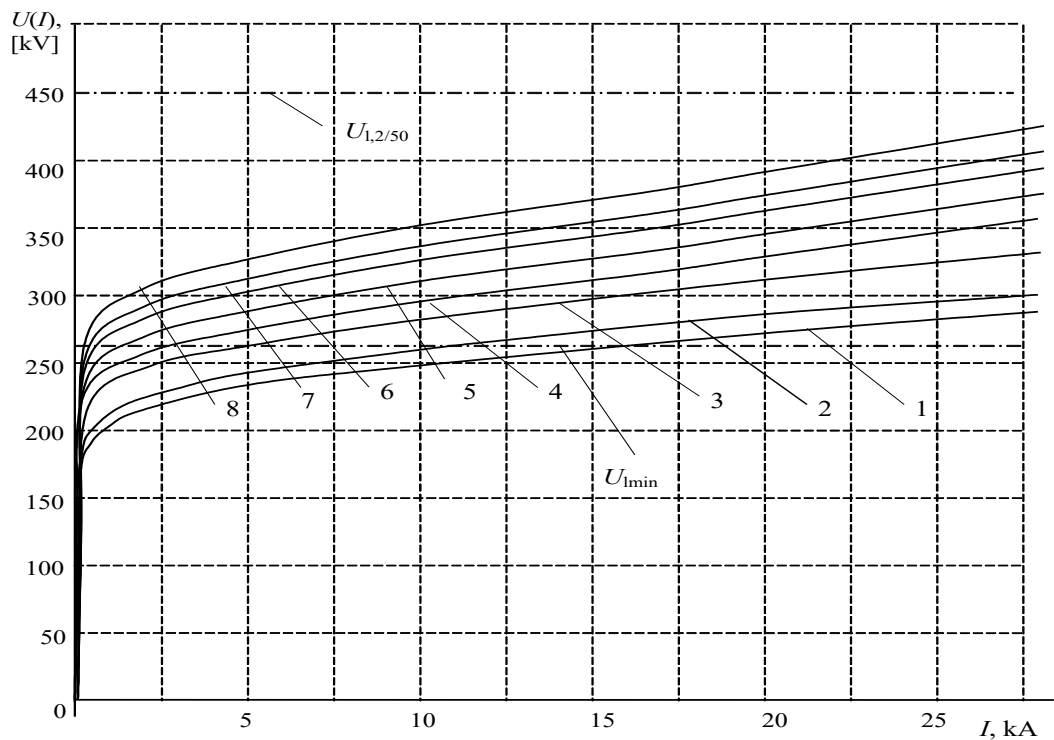
Pavyzdžiui, 110 kV tinkle taikomos tokios ribinės vertės - $U_r=142$ kV, $U_c=114$ kV, o 330 kV tinkle - $U_r=346$ kV, $U_c=277$ kV



6 pav. II klasės 110-123 kV įtampai skirtų viršįtampių ribotuvų voltamperinės charakteristikos, 1 – $U_r=102$ kV; 2 – $U_r=108$ kV; 3 – $U_r=120$ kV; 4 – $U_r=132$ kV; 5 – $U_r=138$ kV; 6 – $U_r=144$ kV

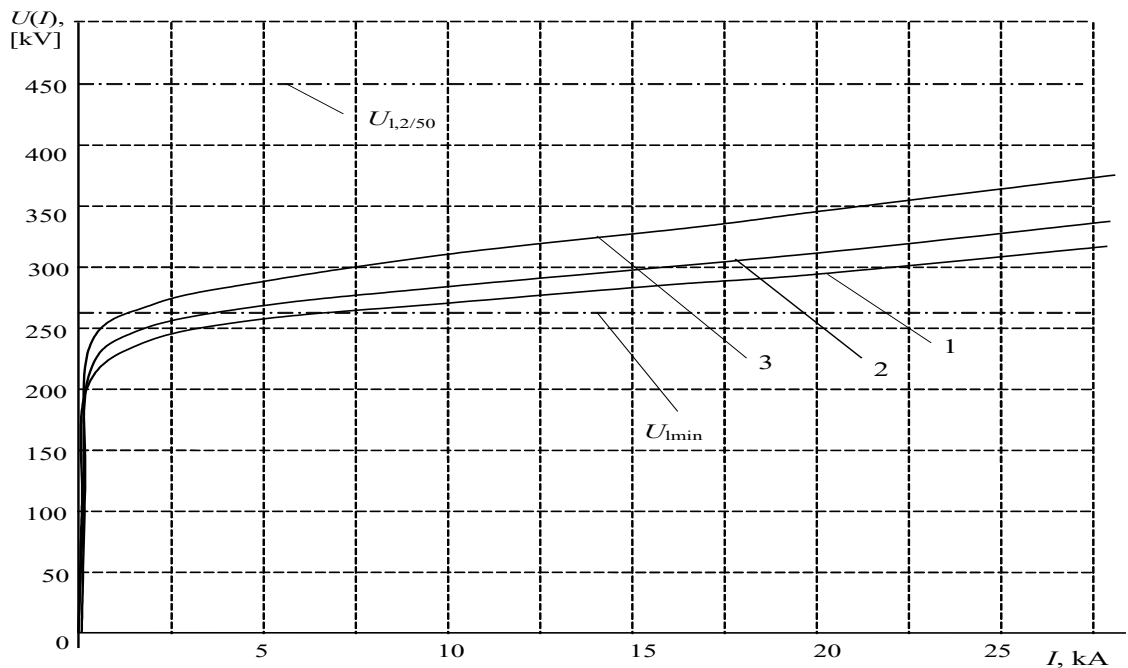
6 pav. pateikiamos II klasės 110 kV įtampai skirtų viršįtampių ribotuvų voltamperinės charakteristikos, esant skirtingoms U_r reikšmėms, kai visų ribotuvų $U_c = 78$ kV. Įvertinus įrenginių izoliacijos bandymų amplitudes, pateiktas tame pačiame paveiksle, matyti, kad ribotuvai, kurių U_r vertė viršija 132 kV, nėra tinkami naudoti 110–123 kV įtampos tinkluose, nes jie nesudaro tinkamos apsaugos pagal izoliacijos koordinavimo principus.

Remiantis III klasės viršįtampių ribotuvų voltamperinėmis charakteristikomis (7 pav.), nustatyta, kad ribotuvai, kurių ilgalaikė leistinoji darbinė įtampa U_c yra 78 kV ir vardinė įtampa U_r neviršija 162 kV, yra pajėgūs efektyviai apriboti viršįtampių amplitudes iki leistinų impulsinės bandymo įtampos lygių, taikomų 110–123 kV įtampos elektros tinkluose.



7 pav. III klasės 110-123 kV įtampai skirtų viršįtampių ribotuvų voltamperinės charakteristikos, 1 – $U_r = 102$ kV; 2 – $U_r = 108$ kV; 3 – $U_r = 120$ kV; 4 – $U_r = 132$ kV; 5 – $U_r = 138$ kV; 6 – $U_r = 144$ kV; 7 – $U_r = 150$ kV; 8 – $U_r = 162$ kV

II, III ir IV klasių viršįtampių ribotuvų voltamperinių charakteristikų palyginimas prie pastovių U_c ir U_r verčių parodytas 8 pav.



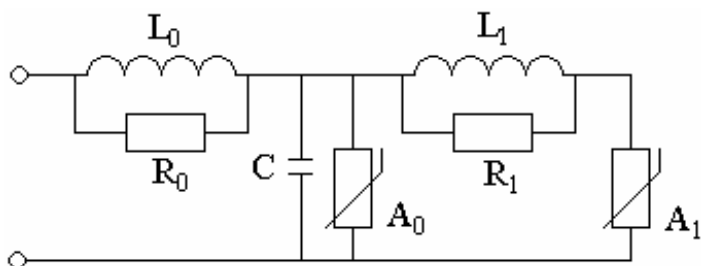
8 pav. Skirtingų klasių 110-123 kV įtampai skirtų viršįtampių ribotuvų su $U_c = 78$ kV ir $U_r = 120$ kV voltamperinės charakteristikos, 1 – IV klasės; 2 – III klasės; 3 – II klasės;

1.2.4. Viršįtampių ribotuvų modeliai

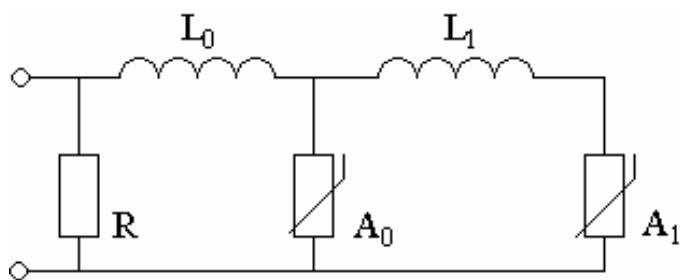
Yra keletas metodų metalo oksido (ZnO) viršįtampių ribotuvų modeliavimui. Laboratoriniai tyrimai parodė, kad šie ribotuvai pasižymi dinaminėmis savybėmis, kurios yra ypač svarbios, kai modeliuojami žaibo smūgiai ar kiti greiti elektromagnetiniai reiškiniai. [13] Ribotuvo modelis dažniausiai vertinamas pagal jo įtampos atsaką į įeinančią elektromagnetinę bangą, kurios fronto trukmė gali svyruoti nuo 0,5 iki 45 mikrosekundžių.

Analizuojant metalo oksido ribotuvų duomenis, nustatyta, kad elektromagnetinės bangos poveikio įvertinimas yra tikslus tik tuomet, kai atsižvelgiama į jų netiesinę voltamperinę charakteristiką. Visgi, eksperimentiniai duomenys taip pat parodė, jog šie ribotuvai turi tam tikrų dinaminių savybių, kurios tampa itin reikšmingos, kai veikiama žaibo impulsų ar kitų stačių frontų viršįtampių. Viena iš tokių savybių yra tai, kad įtampa ribotuve pakyla anksčiau nei per jį pratekant srovei pavyksta pasiekti savo amplitudę. Tai reiškia, kad metalo oksido ribotuvai pradeda riboti atėjusios bangos viršįtampį su tam tikru vėlavimu.

IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) publikacijose siūloma viršįtampių ribotuvų ekvivalentinė grandinė pateikiama 9 pav., o jos supaprastintas variantas – 10 pav.



9 pav. Ekvivalentinė schema, paremta IEEE viršįtampių ribotuvo modeliu



10 pav. Supaprastinta viršįtampių ribotuvo modelio ekvivalentinė schema

Viršįtampių ribotuvo ekvivalentinė schema, pateikta 11 pav., yra tinkama pereinamiesiems reiškiniams, atsirandantiems dėl oro linijos įjungimo ar žaibo išlydžio, modeliuoti [14]. Induktyviniai parametrai gali būti apskaičiuoti remiantis kataloginiuose duomenyse pateiktomis viršįtampių ribotuvų charakteristikomis, taikant šią formulę:

$$L_1 = \frac{1}{4} \cdot \frac{U_{r1/T_2} - U_{r8/20}}{U_{r8/20}} U_n; \quad (8)$$

$$L_0 = \frac{1}{12} \cdot \frac{U_{r1/T_2} - U_{r8/20}}{U_{r8/20}} U_n; \quad (9)$$

čia: U_n – įrenginio vardinė įtampa, kV;

U_{r1/T_2} – liekamoji įtampa, kai teka 10 kA stiprio srovės impulsas su $1/T_2$ mikrosekundžių trukme, kV;

$U_{r8/20}$ – liekamoji įtampa, kai teka 10 kA stiprio srovės impulsas su $8/20$ mikrosekundžių trukme, kV;

T_2 – impulso trukmė iki impulso mažėjančios dalies pusinės amplitudės, μ s.

Viršįtampių pereinamųjų procesų modeliavimui ATP programoje taikomas eksponentinis netiesinės voltamperinės charakteristikos modelis [15]. Kiekvienam įtampos intervalui parenkamos kelios eksponentinės priklausomybės, o srovės ir įtampos santykis aprašomas tokia forma:

$$i = p \left(\frac{v}{U_r} \right); \quad (10)$$

čia: i – srovė per viršįtampių ribotuvą, kA;

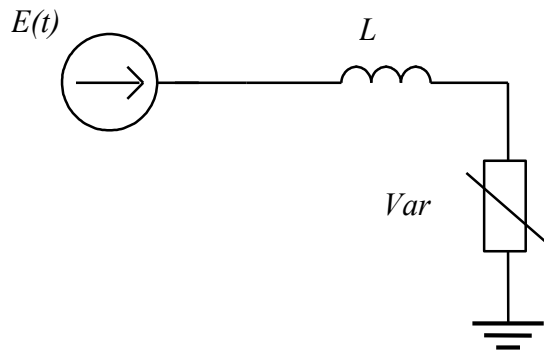
v – įtampa per viršįtampių ribotuvą, kV;

U_r – įtampa per viršįtampių ribotuvą, kV;

p – netiesinės priklausomybės koeficientas.

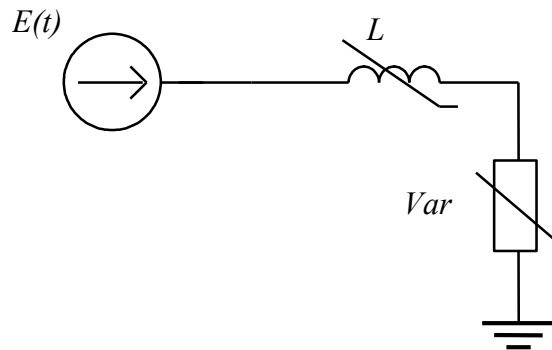
Šiame skaitmeniniame modelyje dalis voltamperinės charakteristikos iki įtampos U_c yra tiesinė, tačiau ji praktiškai nedaro įtakos viršįtampių pereinamajam procesui, kadangi šiame intervale per viršįtampių ribotuvą teka itin silpna srovė. Tolimesnė charakteristikos dalis aprašoma funkcine priklausomybe (10 formulė). Antroji, netiesinė modelio dalis, apibrėžiama parametrais p, q ir minimaliu įtampos lygiu. Kai įtampa viršija ilgalaikę leistinąją reikšmę p, q , algoritmas imituoja atitinkamą voltamperinės charakteristikos elgseną. Kuo labiau modelis atitinka eksponentinę formą, tuo didesnis rezultatų tikslumas. Taip pat laikoma, kad esant staus fronto bangoms, maksimali įtampa ir srovė pasiekiamos tuo pačiu momentu.

Siekiant patikslinti viršįtampių ribotuvo modelį, imituoiant įtampos ir srovės priklausomybę, varistoriui į grandinę nuosekliai įtraukiamas induktyvumo elementas (11 pav.). Taikant šį modelį induktyvumo reikšmė turi būti parenkama atsižvelgiant į elektromagnetinės bangos fronto trukmę [16]. Pavyzdžiui, tam tikra induktyvumo vertė gali tiksliai atkartoti sistemos atsaką esant 8 μ s trukmės bangos frontui, tačiau ta pati reikšmė gali lemti paklaidas, kai fronto trukmė yra 2 μ s.



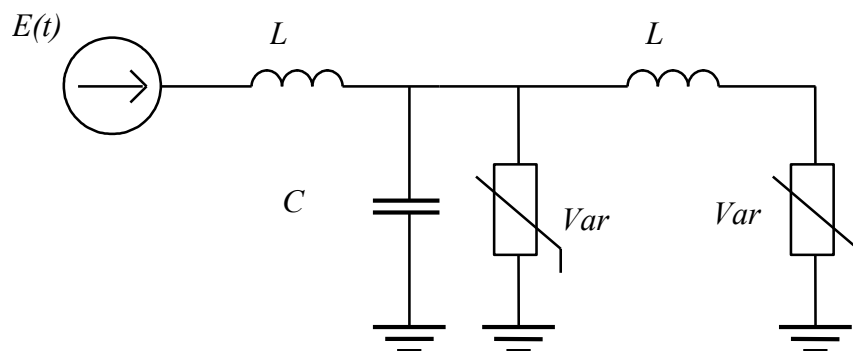
11 pav. Viršįtampių ribotuvo modelis su induktyvumu

Kadangi modelis su pastoviu induktyvumu turėjo trūkumų dėl priklausomybės nuo elektromagnetinės bangos fronto statumo, jis buvo patobulintas, į viršįtampių ribotuvo modelį įtraukiant netiesinį induktyvumą (12 pav.). Pagrindinis šio modelio trūkumas yra tas, kad būtina įdiegti programinį sprendimą, leidžiantį apskaičiuoti netiesinį induktyvumą [17]. Be to, siekiant tiksliai atvaizduoti bangos savybes, būtina naudoti daug einamųjų įtampos taškų.



12 pav. Viršįtampių ribotuvo modelis su netiesiniu induktyvumu

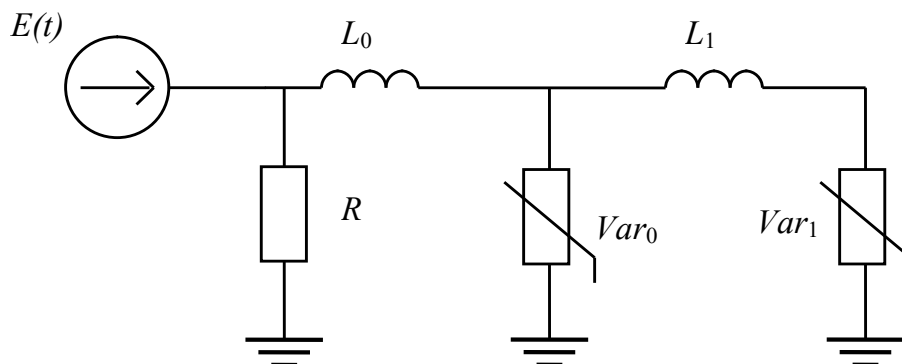
IEEE modelis (9 pav.) buvo supaprastintas, pašalinant tam tikrus elementus ir taikant alternatyvų parametrų apibrėžimo būdą (13 pav.). Pasak autorių, šis modelis pateikia patikimus rezultatus modeliuojant žaibo impulsą, kurio forma yra $8/20 \mu\text{s}$. Tačiau modelis gali būti netikslus, kai sistemoje veikia elektromagnetinės bangos su skirtingomis formomis ir bangos frontų trukmėmis.



13 pav. IEEE pagrindu sukurtas supaprastintas viršįtampių ribotuvo modelis

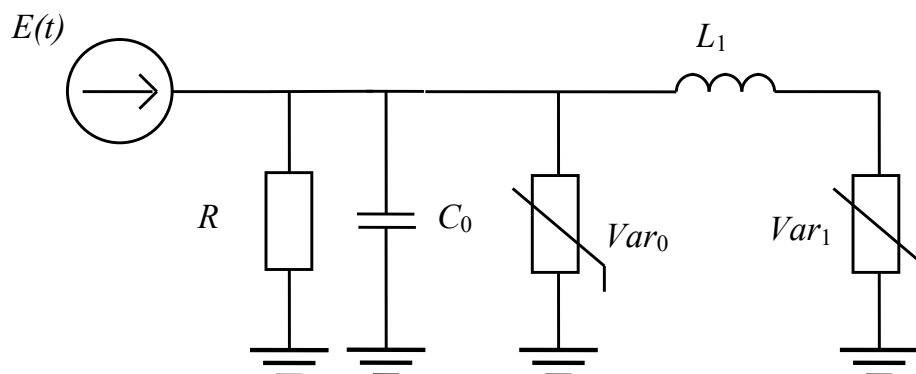
Šis modelis, taip pat pagrįstas IEEE viršįtampių ribotuvo modeliu, pasižymi tuo, kad visi būtini duomenys gali būti tiesiogiai parinkti iš viršįtampių ribotuvų gamintojų techninių charakteristikų,

todėl nereikia pakartotinio parametrų koregavimo. Modelis yra pakankamai tikslus (14 pav.). Be to, jame nenaudojamas talpos elementas – taikomi tik elektriniai parametrai. Dvi lygiagrečios varžos yra pakeistos viena ekvivalentine varža R [18].



14 pav. Supaprastintas IEEE viršįtampių ribotuvo modelis be talpinio elemento

Kitu pagrindu supaprastintas IEEE viršįtampių ribotuvo modelis pavaizduotas 15 pav. Šio modelio taikymui reikalingi tiek elektriniai, tiek fizikiniai parametrai. Dvi lygiagrečiai sujungtos varžos pakeičiamos viena lygiagrečiai prijungta talpine grandimi, o vienas iš induktyviųjų elementų pašalinamas. Be to, būtina užtikrinti, kad tarp Var_0 ir Var_1 šakų tekančių srovių ir joms atitinkančių įtampų santykis būtų lygus 0,02.



15 pav. Supaprastintas IEEE viršįtampių ribotuvo modelis

Tradicinis modelis, IEEE modelis, taip pat Pinceti ir Giannettoni bei Fernandez ir Diaz sukurti modeliai buvo palyginti naudojant ATP programinę aplinką. Modelių palyginimui buvo taikytos viršįtampių ribotuvo ABB EXLIM P-E, kurio vardinė įtampa yra 444 kV, charakteristikos, pateiktos 2 lentelėje. Modeliuose naudojamų elementų parametrų palyginimas pateiktas 3 lentelėje.

2 lentelė. Viršįtampių ribotuvo (ABB EXLIM) charakteristikos

Vardinė įtampa kV	Nominali iškvos srovė, kV	Aukštis, mm	Maksimali įtampa, kV							
			30/60, [μs]			8/20, [μs]			1/2÷20, [μs]	
			0,5	1,0	2,0	5,0	10	20	10	
			kA	kA	kA	kA	kA	kA	kA	kA
444	20	4500	866	897	920	960	1015	1111	1106	

3 lentelė. Modelių elementų parametrai

Modelis	L_1 , [μH]	L_0 , [μH]	R_1 , [Ω]	R_0 , [Ω]	C , [pF]
IEEE	21,75	0,29	94,25	145	68,97
Pinceti ir Giannettoni	0,487	0,162	1000	-	-
Fernandez ir Diaz	0,69	-	1000	-	228,3

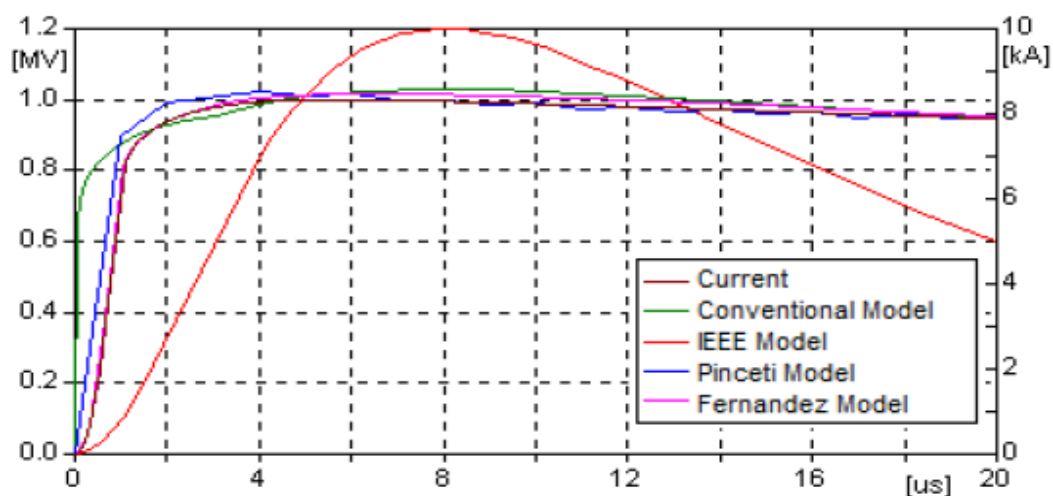
Sulyginimo rezultatai 8/20 μs trukmės elektromagnetinės bangos formai esant 10 kA srovės stipriui, taip pat 1/2 μs bangos formai su tuo pačiu srovės stipriui, pateikti 4 lentelėje kartu su amplitudžių vertės paklaidomis, palygintomis su 4 lentelėje pateiktais duomenimis. Maksimalios įtampos pasiekimo laikas kiekvienam modeliui nurodytas 5 lentelėje. Kiekvieno modelio atsakas į 8/20 μs ir 1/2 μs bangos formas su 10 kA srove pavaizduotas atitinkamai 16 ir 17 paveiksluose.

4 lentelė. Viršįtampių ribotuvų modelių palyginimas

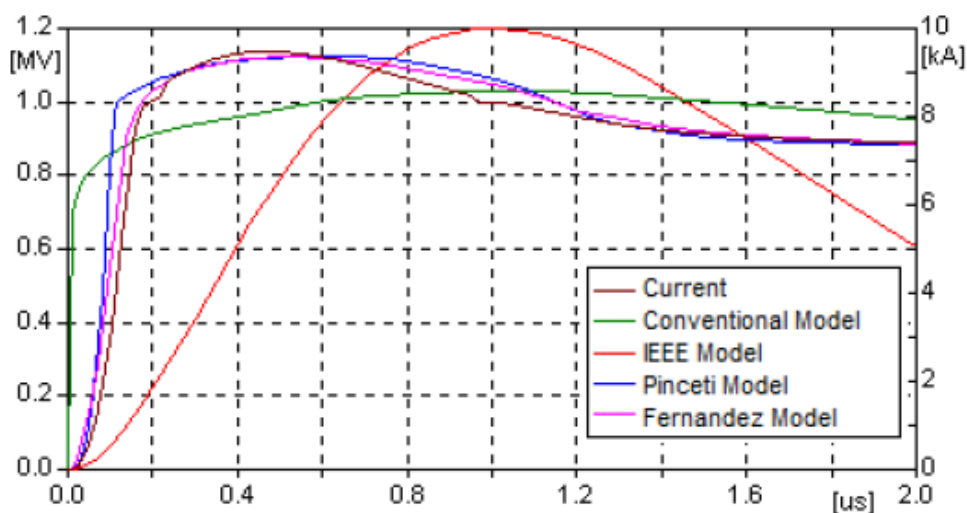
Modelis	10 kA banga 8×20 [μs]		10 kA banga 1×2 [μs]	
	Įtampa, [kV]	Paklaida, %	Įtampa, [kV]	Paklaida, %
Tradicinis	1028,77	1,30	1028,77	7,5
IEEE	1023,62	0,84	1158,03	4,7
Pinceti ir Giannettoni	1017,60	0,25	1121,57	1,4
Fernandez ir Diaz	998,25	1,6	1137,79	2,8

5 lentelė. Amplitudžių laikų palyginimas

Modelis	Laikas, [μs]	
	8×20 [μs]	1×2 [μs]
Tradicinis	8,00	1,00
IEEE	6,00	0,57
Pinceti ir Giannettoni	6,19	0,53
Fernandez ir Diaz	5,58	0,46



16 pav. Modelių į bangos formas 8x20 μs su 10 kA

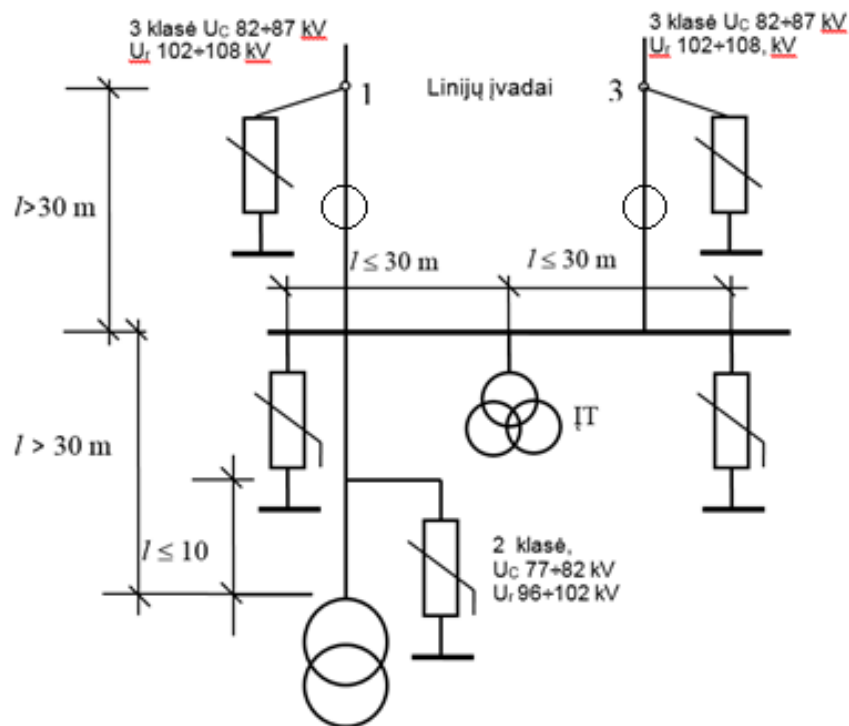


17 pav. Modelių bangos $1 \times 2 \mu\text{s}$ su 10 kA formų palyginimas

Remiantis autorių pateiktų lyginamųjų skaičiavimų analize, galima daryti išvadą, kad analitiniai viršįtampių ribotuvų modeliai, apibūdinantys bangos formą ir parametrus, nėra visiškai adekvatūs. Kai kurie modeliai tiksliai neatvaizduoja tikrosios bangos formos, o kitu atveju apskaičiuotos įtampos amplitudės reikšmės pasižymi reikšminga paklaida.

1.2.5. Viršįtampių ribotuvų išdėstymas pastotėje

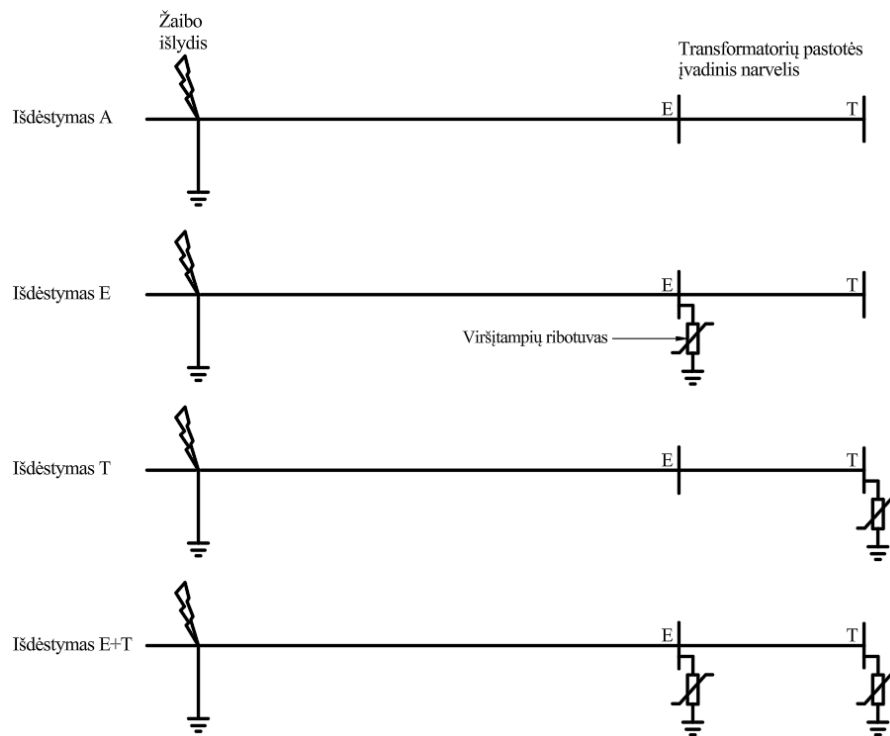
Aukštos įtampos pastotėse viršįtampių ribotuvai paprastai įrengiami prie svarbiausių įrenginių, kuriuos norima apsaugoti: galios transformatorių, išvadų į oro linijas, matavimo transformatorių ar kabelių galų. Pagrindinė taisyklė – ribotuvas turi būti kuo arčiau saugomo įrenginio – srovėlaidžio ilgis tarp viršįtampių ribotuvo ir saugomo įrenginio turi būti minimalus. Taip užtikrinama, kad viršįtampio banga bus „sugaunama“ vos atsklidusi į pastotę ir nespės išsivystyti iki didesnės amplitudės viršįtampio. Lietuvos perdavimo skirstymo operatorius (PSO) nustato konkrečius atstumus: jei nuo linijos įvade sumontuoto ribotuvo iki saugomo įrenginio (pvz., transformatoriaus ar skirstyklos įtampos transformatoriaus) yra daugiau nei 30 metrų laidininko, toks atstumas laikomas per dideliu. Tokiu atveju būtina papildomai prie pat įrenginio numatyti antrą II klasės viršįtampių ribotuvą. Pavyzdžiui, 110 kV transformatoriaus prijunginyje rekomenduojama montuoti ribotuvą ne toliau kaip ~ 10 m nuo transformatoriaus įvado gnybtų. Jeigu ribotuvas pastatomas toliau (pvz., tik linijos gale), ilguose kabeliuose ar šynose gali susidaryti didesnis viršįtampis dėl banginio proceso. 18 pav. schematiškai pavaizduota tipinė 110 kV pastotės apsaugos konfigūracija: kiekvienos įeinančios oro linijos atramoje (įvade) įrengtas ribotuvas, o nuo įvado iki transformatoriaus esant ilgesnei atkarpai – papildomas ribotuvas prie transformatoriaus [19]. Todėl paprastai nepakanka vieno ribotuvo visai pastotei: jie montuojami kiekviename įvade (linijų ir transformatorių). Jei kurioje nors grandinėje trūksta ribotuvo, būtent per tą grandinę viršįtampis gali nusklisti iki neapsaugotos įrangos.



18 pav. Viršįtampių ribotuvų taikymas linijų įvaduose ir šynose, prie kurių prijungti viršįtampiams jautrūs įrenginiai, esantys toliau nei 30 m

Straipsnyje nagrinėjamas viršįtampių ribotuvų skaičiaus bei jų įrengimo vietos poveikis aukštos įtampos (230/63 kV) pastočių patikimumui ir žaibo viršįtampių lygio mažinimui [6]. Tyrime buvo modeliuojamos trys skirtingos pastočių konfigūracijos bei keturios ribotuvų išdėstymo schemas (19 pav.): be ribotuvų (A), tik įvade (E), tik prie transformatoriaus (T) ir kartu įvade bei prie transformatoriaus (E+T).

Modeliavimo rezultatai parodė aiškia priklausomybę tarp ribotuvų vietos bei jų poveikio viršįtampių slopinimui. Be ribotuvų žaibo išlydžio sukeltas viršįtampis kai kuriose tinklo vietose pasiekė iki 2700 kV – tai viršija leistinus įtampus lygius. Įdiegus tik vieną ribotuvą, pastebėtas dalinis efektas: pavyzdžiui, prie įvado įrengtas ribotuvas (išdėstymas E) sumažino viršįtampį iki vidutiniškai 1700–2000 kV. Tik dviejų ribotuvų schema (E+T) sugebėjo efektyviai sumažinti viršįtampius iki saugių ribų – dažniausiai žemiau 700 kV, užtikrinant apsaugą tiek matavimo transformatoriams, tiek galios transformatoriams.



19 pav. Viršįtampių ribotuvų išdėstymo principinės schemos

Be to, atlikta patikimumo analizė atskleidė, kad nors kiekvienas papildomas ribotuvas šiek tiek sumažina sistemos patikimumą normaliomis sąlygomis (dėl didesnio komponentų skaičiaus, gedimų tikimybės). Kuo didesnis žaibų tikėtinas smūgių dažnis per metus, tuo didesnė ribotuvų įtaka patikimumui.

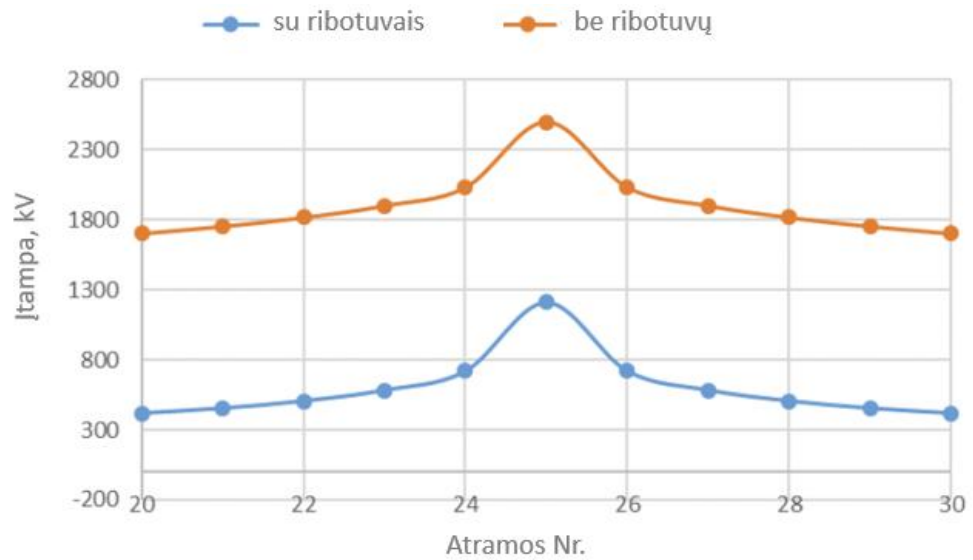
1.2.6. Viršįtampių ribotuvų išdėstymas oro linijoje

Tradiciškai oro linijų žaibosaugai naudojami žaibosaugos trosai – vienas ar du plieniniai laidai, nutiesti virš fazinių laidų ir sujungti su atramų įžeminimu. Žaibosaugos trosai perima tiesioginius žaibo smūgius, tačiau jie neapsaugo nuo atramų atgalinių pramušimų ir negali visiškai nuslopinti viršįtampio bangos, einančios linija. Todėl papildomai gali būti naudojami linijiniai viršįtampių ribotuvai. Dažniausias sprendimas – ribotuvai ant pirmųjų atramų prie pastotės. Kai žaibas trenkia į oro liniją netoli pastotės, itin status viršįtampio frontas atkeliauja iki artimiausios atramos ir pastotės įvado. Pastotėje esantis ribotuvas jį apriboja, tačiau tam tikra viršįtampio dalis spėja pasiekti įrangą [20]. Jei ant 1-osios atramos (lauke, prieš pastotę) įrengtas ribotuvas, viršįtampis „nukertamas“ dar anksčiau – taigi iki pastotės ateina gerokai mažesnė banga. Tyrimai 110 kV hidroelektrinės pastotėje (Kroatijoje) parodė, kad papildomų ribotuvų įrengimas ant pirmųjų linijos atramų gali ~30–40 % sumažinti transformatorių patiriamų viršįtampių amplitudes, lyginant su vien tik pastotės įvadinuose narveliuose įrengtais ribotuvais.

Turkijos mokslininkai PSCAD programinio paketo aplinkoje modeliavo 330 kV perdavimo liniją, kurioje buvo analizuojama žaibo viršįtampių slopinimo efektyvumas naudojant viršįtampių ribotuvus [21]. Buvo sumodeliuota 20 km ilgio oro linijos atkarpa su 50 atramų. Modeliuoti scenarijai: žaibo smūgiai į fazinius laidus ir žaibosaugos trosą – su ribotuvais ir be jų (20 pav).

Žaibo smūgis į fazinius laidus be ribotuvų sukėlė viršįtampius iki 2498 kV, kas viršija 380 kV tinklų izoliacijos lygį (1550 kV). Įdiegus ribotuvus pirmojoje atramoje, viršįtampio dydis sumažėjo iki

1214 kV. Taip pat modeliuojant žaibo smūgius į trosą buvo nustatyta tiesioginė priklausomybė nuo atramos įžeminimo varžos. Kuo įžeminimo varža mažesnė tuo viršįtampių lygis mažesnis ir atvirkščiai.



20 pav. Viršįtampiai su ir be viršįtampių ribotuvų

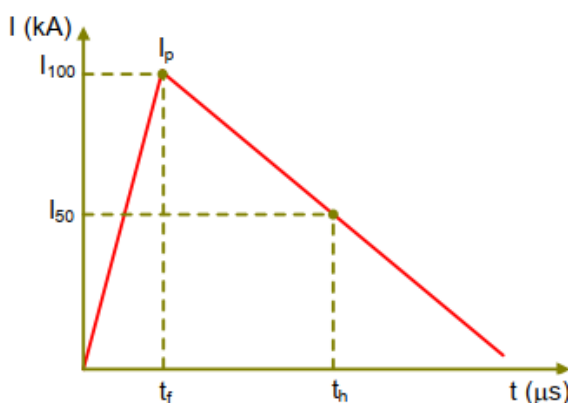
2. Metodinė dalis

Žaibo išlydis į perdavimo liniją ar pastotę yra pagrindinė greitųjų frontų pereinamųjų procesų atsiradimo priežastis elektros energetikos sistemoje. Šie greitieji pereinamieji procesai pasižymi plačiu dažnių spektru – nuo 10 kHz iki 1 MHz.

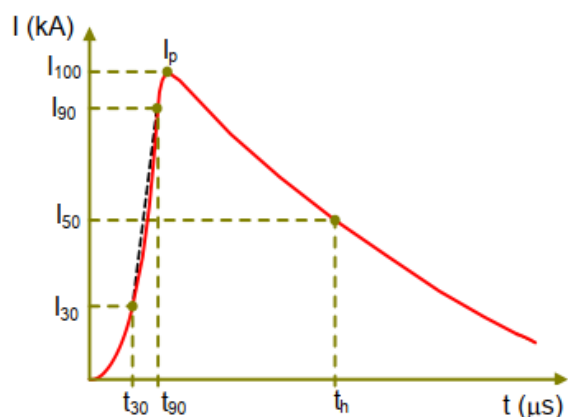
2.1. Žaibo viršįtampis

Žaibo smūgis elektros tinkle dažnai modeliuojamas kaip impulsinis srovės šaltinis, kurio didžiausia vertė gali siekti nuo kelių kiloamperų iki daugiau nei 200 kA. Toks srovės impulsas sukelia staigius viršįtampius, kurių forma ir trukmė lemia izoliacijos bei viršįtampių ribotuvų apkrovimą [22].

Paprasčiausias žaibo impulso atvaizdavimas yra dvigubos rampos modelis (21 pav.), kuriame srovės kilimo ir mažėjimo etapai pateikiami kaip dvi tiesinės atkarpos. Tačiau tikroviškesnis atvaizdavimas gaunamas taikant CIGRE modelį (22 pav.), kuris aprašo įgaubtą kylimo frontą ir eksponentinį mažėjimą. Šis modelis tiksliau atspindi izoliatorių pramušimo riziką, kadangi aktualus ne tik impulsinės viršūnės dydis, bet ir bangos forma.



21 pav. Žaibo išlydžio dvigubos rampos bangos forma



22 pav CIGRE žaibo išlydžio bangos forma

Statistinei žaibo analizei taikomas Andersono skirstinys, leidžiantis įvertinti tikimybę, kad smūgio piko srovė viršys tam tikrą ribinę vertę I . Ši tikimybė apskaičiuojama pagal formulę:

$$P = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2.6}}; \quad (11)$$

čia: P – tikimybė, kad žaibo smūgio pikinė srovė bus $\geq I$;

I – nurodyta srovės reikšmė, kA;

Žaibo bangos statusas yra esminis parametras, ypač vertinant ribotuvų reakciją ir įtampos pasiskirstymą izoliacijoje. Jis apskaičiuojamas pagal šią empirinę formulę:

$$S = \alpha \cdot I^\beta; \quad (12)$$

čia: S – statusas (kA/ μ s);

I – nurodyta srovės reikšmė, kA;

6 lentelėje pateikiamos dvi impulsų kategorijos:

- pirmasis žaibo smūgis (dažniausiai pasižymi didesne amplitude, bet mažesniu statumu),
- pakartotinis žaibo smūgis (paprastai turi statesnį kilimo frontą, mažesnę amplitudę).

6 lentelė. Viršįtampių ribotuvo (ABB EXLIM) charakteristikos

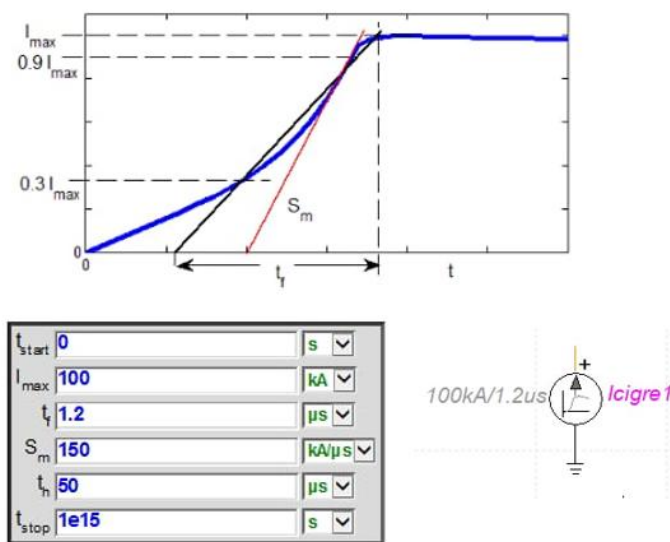
Žaibo išlydis	Statumo tipas	α	β	Paaiškinimas
Pirmasis žaibo smūgis	S_{30}	3,2	0,25	Vidutinis statusas pirmo impulso kilimo fronte
	S_{m-}	3,9	0,55	Maksimalus statusas pirmo impulso metu
Pakartotinis žaibo smūgis	S_{30}	6,9	0,42	Didesnis statusas dėl statesnio kilimo fronto
	S_m	3,8	0,93	Labai aukštas maksimalus statumo laipsnio augimas

Abi kategorijos turi po du skirtingus statumo skaičiavimo būdus:

- S_{30} – statusas tarp $0,3 \cdot I_p$ ir $0,3 \cdot I_p$ dažnai naudojamas praktikoje kaip standartizuotas vertinimo kriterijus.
- S_{m-} – maksimalus impulso kylimo statusas, t. y. didžiausias dI/dt .

Modeliavimui EMTP programoje naudojamas CIGRE valdomas žaibo šaltinis, kurio parametrai pateikti 23 pav.. Parametrų reikšmės:

- t_{start} – impulso pradžios laikas (jei $t < t_{start}$, šaltinis neaktyvus), s;
- I_{max} – žaibo piko srovė, kA;
- t_f – fronto trukmė, μ s;
- S_m – maksimalus statusas, kA/ μ s;
- t_h – trukmė iki pusinės srovės vertės, μ s;
- t_{stop} – pabaigos laikas (kai $t > t_{stop}$, šaltinis vėl tampa neaktyvus), s.

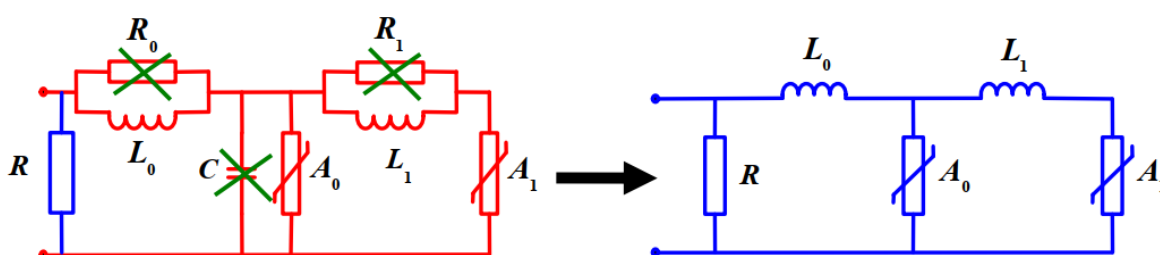


23 pav CIGRE modelio žaibo impulso konfigūracija EMTP aplinkoje

2.2. Viršįtampių ribotuvas

Tiriant viršįtampių ribotuvų veikimą pereinamųjų procesų metu, svarbu tinkamai modeliuoti jų dinaminį atsaką. Vienas iš plačiausiai taikomų metodų – beertmio ZnO ribotuvo modeliavimas, paremtas IEEE rekomendacijomis. Šis modelis atsižvelgia į dažnių priklausomybę ir leidžia tiksliau atkurti ribotuvo atsaką į žaibo impulsus ar kitokio pobūdžio viršįtampius.

Pilnas IEEE modelis susideda iš kelių nuosekliai ir lygiagrečiai sujungtų elementų: rezistorių (R), induktyvumų (L_1 , L_0), bei talpos (C). Toks modelis reikalauja iteracinio parametru identifikavimo proceso ir išsamių gamintojo duomenų. Supaprastintas IEEE modelis leidžia supaprastinti skaičiavimus bei integraciją į skaitmeninio modeliavimo aplinkas. Jame pašalinama talpa (C), dvi lygiagrečios varžos pakeičiamos viena bendra varža R , likusieji parametrai nustatomi pagal gamintojo pateiktus duomenis. Modelio struktūrinė schema parodyta 24 paveiksle. Tokia supaprastinta schema išlaiko pakankamą tikslumą, tuo pačiu supaprastindama skaitmeninį sprendimą.



24 pav ZnO ribotuvo schemas supaprastinimas pagal IEEE modelį

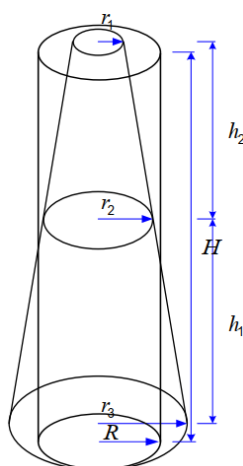
Ribotuvo netiesinės savybės aprašomos dviem kreivėmis – A_0 ir A_1 , kurios atspindi ZnO varistoriaus elgseną esant skirtingiems srovės dydžiams. Šios kreivės išreiškia įtampos ir srovės priklausomybę logaritminėje skalėje. Jos nustatomos remiantis likutinės įtampos verte $U_{r,8/20}$, išmatuota atliekant impulsinį iškrovo bandymą su 10 kA srove ir 8/20 μ s formos impulsu. Modeliui reikalingi induktyvumai L_1 ir L_0 apskaičiuojami naudojant 8 ir 9 formules, kuriose naudojamos likutinės įtampos reikšmės pagal skirtingus srovės impulsus. Šios formulės leidžia įtraukti į modelį ribotuvo dinaminį atsaką ir užtikrinti jo elgsenos tikslumą trumpalaikių viršįtampių metu.

2.3. Oro linijos atrama

Modeliuojant žaibo viršįtampius perdavimo linijoje, itin svarbu tinkamai atvaizduoti atramos elektromagnetinį atsaką. Kadangi žaibo sukeltas bangos frontas yra labai status, būtina naudoti detalių modeliavimą, kuris tiksliai atkurtų atspindžius ir bangos plitimą atramos konstrukcijoje. Aukštos įtampos perdavimo linijos atramos modeliavimas yra esminis žaibo sukeltų pereinamųjų procesų tyrimų komponentas. Žaibo išlydžiui pataikius į atramą, susidaro žaibo banga, kuri juda aukštyn ir žemyn atrama bei atsispindi nuo žemės ir viršutinės atramos dalies. Dėl šių atspindžių izoliuojančiosios grandinės taškuose gali padidėti įtampa, viršijanti izoliatorių elektrinį atsparumą. Šis reiškinys vadinamas atgaliniu viršįtampiu.

Tyrimuose dažniausiai taikomas sukoncentruotų parametrų (CP) modelis, kuris naudojamas atramos, laidininkų ar kabelių elektriniams parametrų (tokiems kaip induktyvumas, varža, talpa) aprašyti, laikant, kad šie parametrai sukoncentruoti tam tikrame taške ar atkarpoje, o ne paskirstyti tolygiai per visą ilgį. Tai supaprastina skaičiavimus, ypač esant aukšto dažnio pereinamosioms būsenoms, pavyzdžiui, žaibo smūgiui.

CP modelis EMTP aplinkoje reprezentuoja atramą kaip vieno laidininko paskirstytųjų parametrų elementą (25 pav.).



25 pav Oro linijos atramos geometrinis modelis banginei varžai nustatyti

Tokio modelio banginė varža apskaičiuojama:

$$Z_{surge} = 60 \ln \left(\cot \left(\frac{1}{2} \tan^{31} \left(\frac{R_{vid}}{h_1 + h_2} \right) \right) \right); \quad (13)$$

$$R_{vid} = \frac{r_1 \cdot h_2 + r_2(h_2 + h_2) + r_3 \cdot h_1}{h_1 + h_2}; \quad (14)$$

čia: Z_{surge} – banginė varža, Ω ;

R_{vid} – vidutinis atramos spindulys, m;

h_1 – bokšto aukštis nuo pagrindo iki vidurinės dalies, m;

h_2 – bokšto aukštis nuo vidurinės dalies iki viršaus, m.

r_1 – bokšto viršutinės dalies spindulys, m;

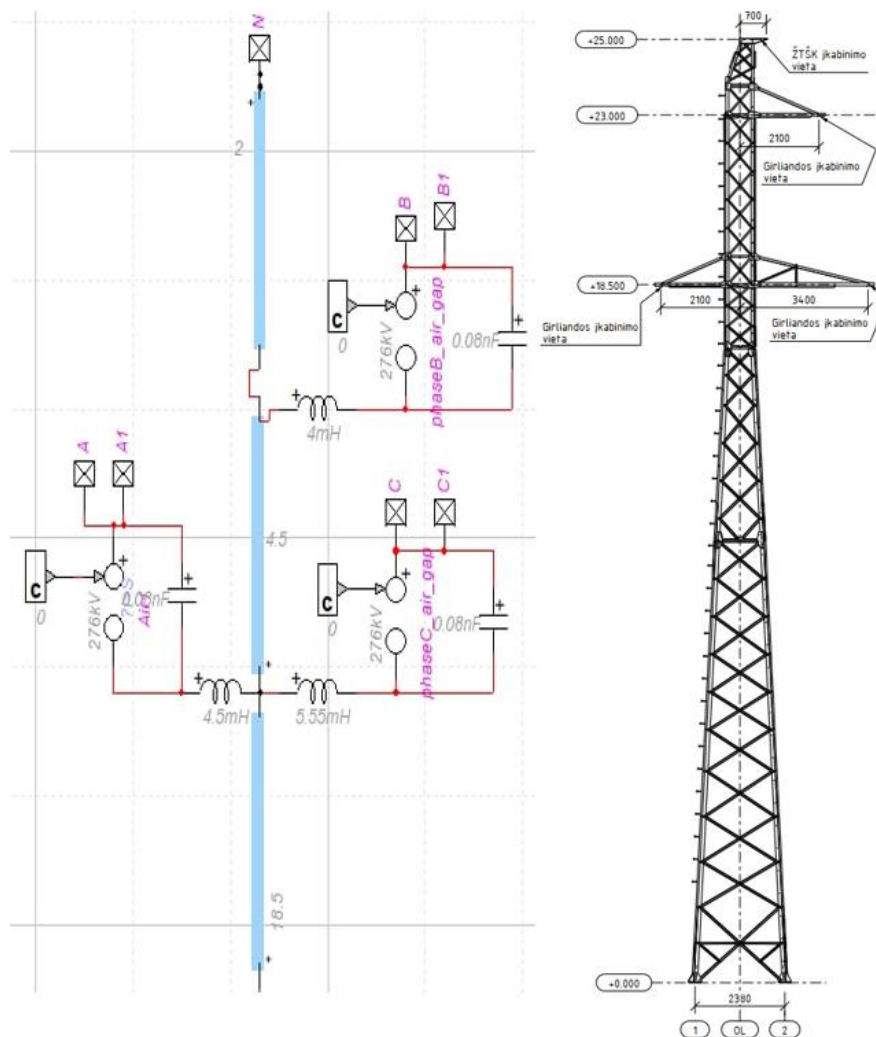
r_2 – bokšto vidurinės dalies spindulys, m;

r_2 – bokšto pagrindo spindulys, m.

Kai bokšto spindulys yra žymiai mažesnis nei jo aukštis ($R \ll H$). Tokiu atveju bokštas aproksimuojamas kaip vienalyčio skerspjūvio cilindras, o tai leidžia supaprastinti varžos skaičiavimus:

$$Z_{surge} = 60 \left[\ln \left(\frac{H}{R_{vid}} \right) - 1 \right]; \quad (16)$$

Modeliavimui atrama padalinama į kelias sekcijas, atitinkančias realias bokšto dalis: apatinė sekcija (18,5 m), vidurinė dalis (4,5 m) ir viršutinė dalis (2 m) [23]. Kiekviena sekcija modeliuojama kaip be nuostolių linija, nurodant bangos varžą ir bangos sklidimo greitį ($3 \cdot 10^8$ m/s arba 80 % šviesos greičio). Kadangi traversos trumpos jos modeliuojamos kaip induktyviniai elementai.



26 pav Tipinės 110 kV tarpinės atramos realizavimas EMTP modelyje

Kadangi žaibo impulsai dažnai sukelia elektros išlydžius per atramos esančius izoliatorius, būtina integruoti oro tarpo modelį, kuris leidžia simuliuoti izoliacijos pramušimo procesą. EMTP programoje naudojamas plotinis kriterijus, pagrįstas impulso įtampos integraliniu poveikiu:

$$\int_{t_0}^t (V_{gap}(t) - V_0)^k dt \geq D; \quad (15)$$

čia: $V_{gap}(t)$ – laiko momentu t susidaranti įtampa per tarpą, kV;

V_0 – minimali įtampa, nuo kurios prasideda išlydis, kV;

k – eksponentė;

D – izoliatoriaus pramušimo riba.

2.4. Atramos įžeminimo varža

Atramos modelyje būtina įtraukti atramos įžeminimo varžą, ypatingą dėmesį skiriant jos priklausomybei nuo žaibo srovės dydžio, kuri kinta dėl dirvožemio jonizacijos reiškinio. Įžeminimo varža yra vaizduojama kaip nuo srovės priklausanti netiesinė varža, kuri apskaičiuojama:

$$R_T = \frac{R_0}{\sqrt{1 + \frac{I}{I_g}}}; \quad (17)$$

$$I_g = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{E_0 \rho}{R_0^2}; \quad (18)$$

čia: R_T – įžeminimo varža, Ω ;

R_0 – įžeminimo varža esant mažai srovei ir žemam dažniui, Ω ;

I – žaibo srovė, tekanti per varžą, kA;

I_g – ribinė srovė, nuo kurios prasideda dirvožemio jonizacija, kA;

ρ – dirvožemio varža, Ωm ;

E_0 - dirvožemio jonizacijos gradientas (400 kV/m).

2.5. Transformatorių pastotė

Viršįtampių 110 kV pastotėje ir ribotuvų sąlygų tyrimams yra sudaryta elektromagnetinių pereinamųjų vyksmų modeliavimo skaitmeniniam viršįtampių analizatoriui skaičiuojamoji schema. Schemas elementai, kombinuotas srovės ir įtampos matavimo transformatorius, galios

transformatorius, jungtuvas ir skyrikliai, modeliuojami sutelktais ekvivalentinės talpos elementais. Skaičiuojamosios schemos sąlyginiuose mazguose esančių talpų dydžiai yra pateikti 7 lentelėje.

7 lentelė. Modelio skaičiuojamosios schemos ekvivalentinės talpos

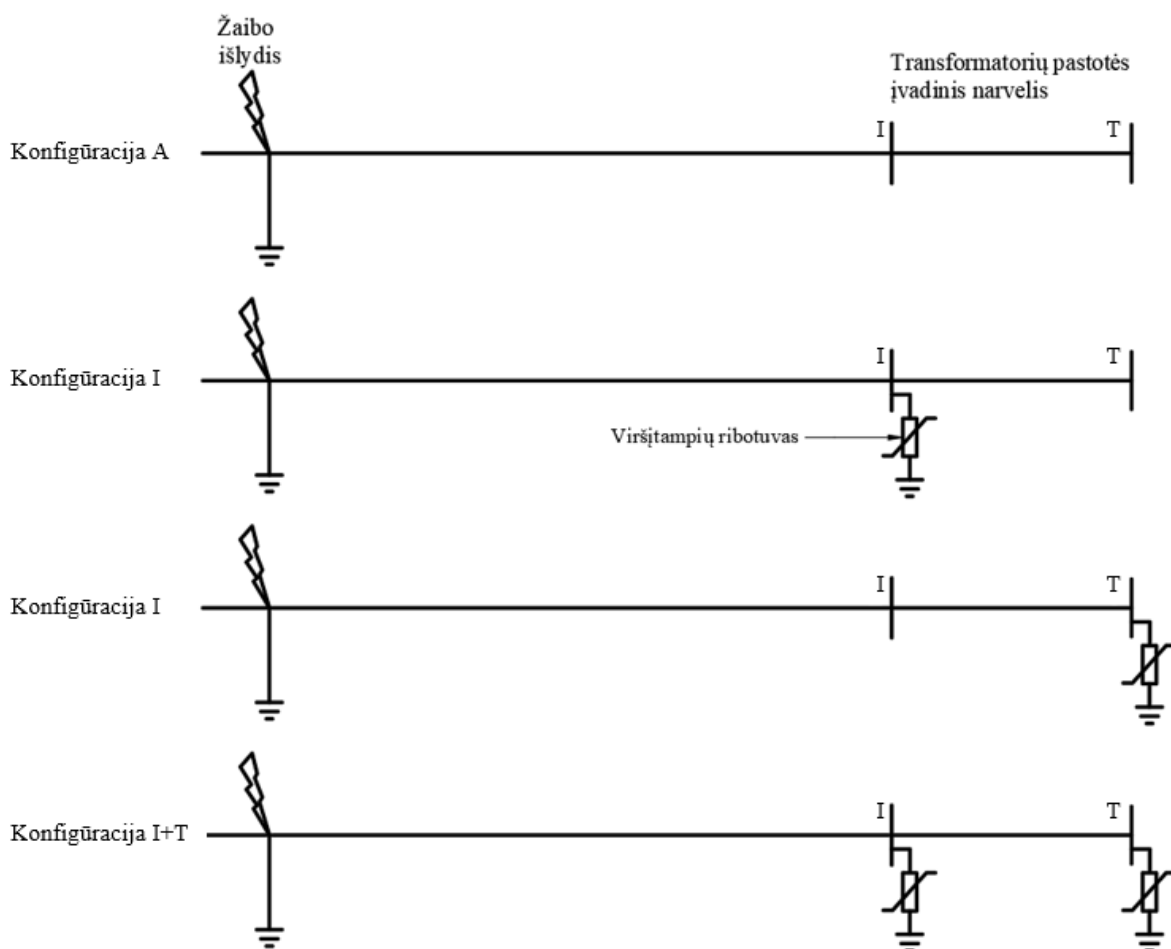
Identifikavimas schemoje	Įrenginio pavadinimas	Ekvivalentinė talpa, pF
L_T101	Skyriklis	60
ST_İT_T101	Kombinuotas ST/İT transformatorius	900
T101	Jungtuvas	800
T1	Galios transformatorius	1600

3. Tiriamoji dalis

Tyrimo tikslas – nustatyti viršįtampių ribotuvų optimalius parametrus, efektyviausią pastatymo vietą, siekiant sumažinti žaibo sukeltus viršįtampius iki įrenginių leidžiamų izoliacijos lygio. Tyrime analizuojami keli scenarijai su skirtingomis žaibo impulso vertėmis (20 kA/1,2 μ s, 30 kA/1,2 μ s, 50 kA/1,2 μ s ir 100 kA/1,2 μ s), skirtingomis žaibo išlydžio vietomis, skirtingomis viršįtampių ribotuvų klasėmis ir skirtingomis viršįtampių ribotuvų išdėstymo vietomis (27 pav.):

1. skirstykla be ribotuvų (A konfigūracija);
2. skirstykla su ribotuvu įvade (I konfigūracija);
3. skirstykla su ribotuvu prie galios transformatoriaus (T konfigūracija);
4. skirstykla su ribotuvu įvade ir prie galios transformatoriaus (I+T konfigūracija).

Matavimai atliekami prie matavimo transformatoriaus (MT) ir galios transformatoriaus (T).



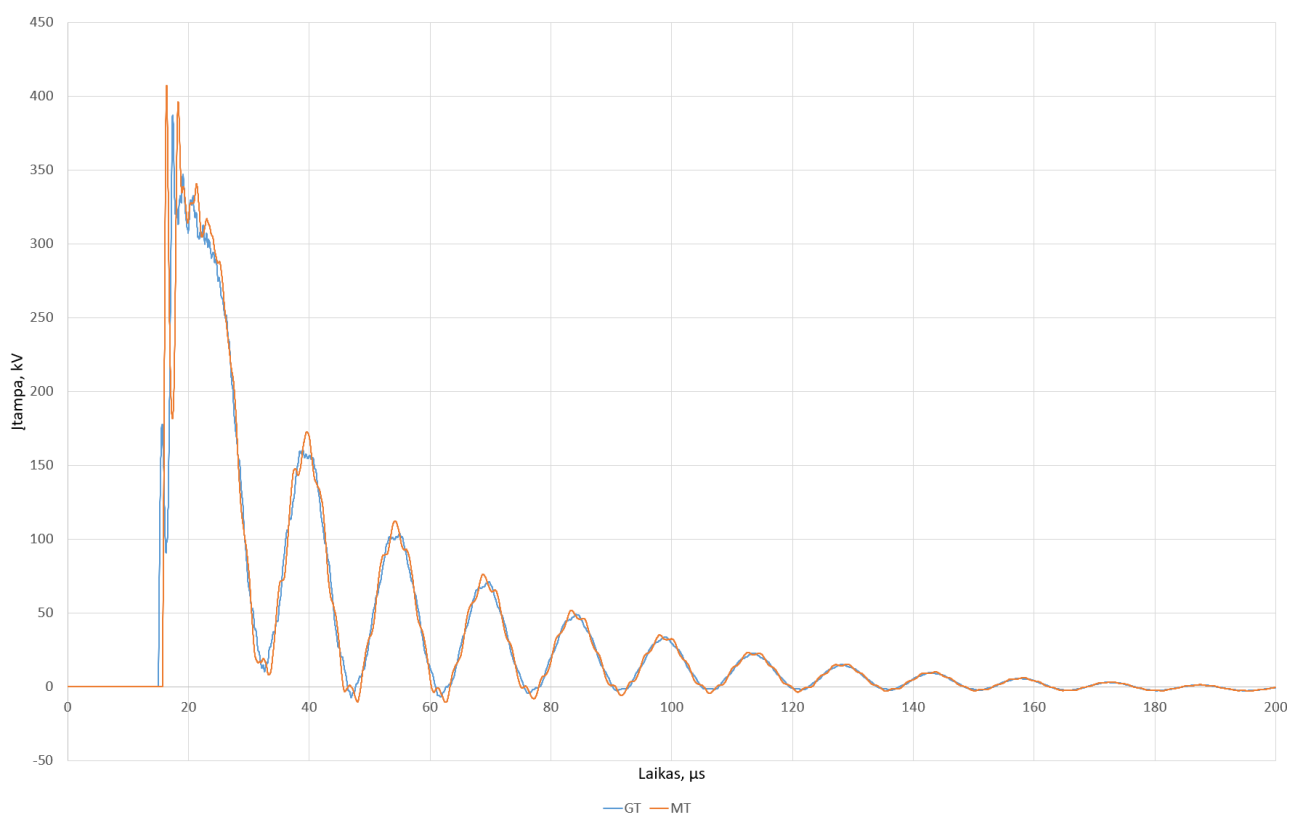
27 pav. Supaprastintos perdavimo linijos ir pastotės skirtingų modelių konfigūracijos

3.1. Tyrimas su III ir II klasės viršįtampių ribotuvais

Modeliavimas atliekamas su III kl. viršįtampių ribotuvu ($U_r=108$ kV, $U_c=87$ kV) įrengtu įvade ir II kl. ribotuvu ($U_r=102$ kV, $U_c=82$ kV) įrengtu prie galios transformatoriaus.

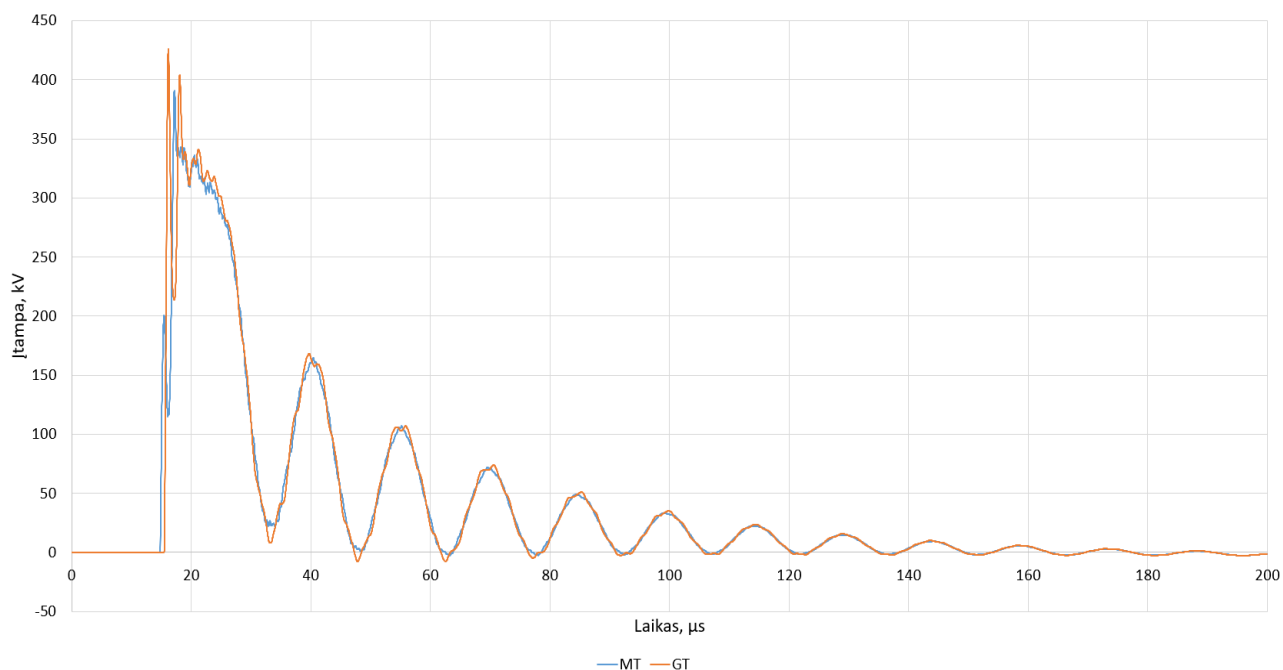
8 lentelė. Maksimalių viršįtampių pasiskirstymas po 20 kA/1,2 μ s žaibo impulso

Žaibo išlydžio vieta	Maksimali įtampa, kV							
	MT				GT			
	A	I	T	I+T	A	I	T	I+T
Skirstyklos įvadas	1169.42	431.04	697.33	387.22	1175.13	478.69	437.83	325.16
50 m nuo skirstyklos	940.86	353.38	503.72	321.76	1058.37	384.12	352.01	300.64
100 m nuo skirstyklos	864.86	374.46	459.89	351.71	971.97	394.04	340.92	309.40
350 m nuo skirstyklos	804.95	363.36	519.25	331.19	913.01	414.48	371.28	293.64
1200 m nuo skirstyklos	510.37	270.17	341.73	245.20	512.55	305.31	261.53	240.51
1250 m nuo skirstyklos	472.10	246.87	338.95	239.10	482.78	304.14	259.19	234.68



28 pav. 20 kA/1,2 μ s žaibo impulsas skirstyklos įvade

Iš analizės matyti, kad viršįtampių reikšmės yra didžiausios, kai žaibas trenkia tiesiai į skirstyklos vidų. Tuo atveju prie matavimo transformatoriaus (MT) maksimali įtampa siekia 1169,42 kV, o tai viršija leidžiamą įrenginių žaibo impulsinę įtampą (550 kV). Taip pat pastebima, kad efektyviausia konfigūracija šiuo atveju yra I+T, kai ribotuvai įrengti tiek prie MT, tiek prie GT – pasiekiamos mažesnės įtampos (pvz., skirstyklos įvade – 387,22 kV). Tai rodo, kad dvigubas ribotuvų įrengimas reikšmingai sumažina viršįtampių amplitudes.

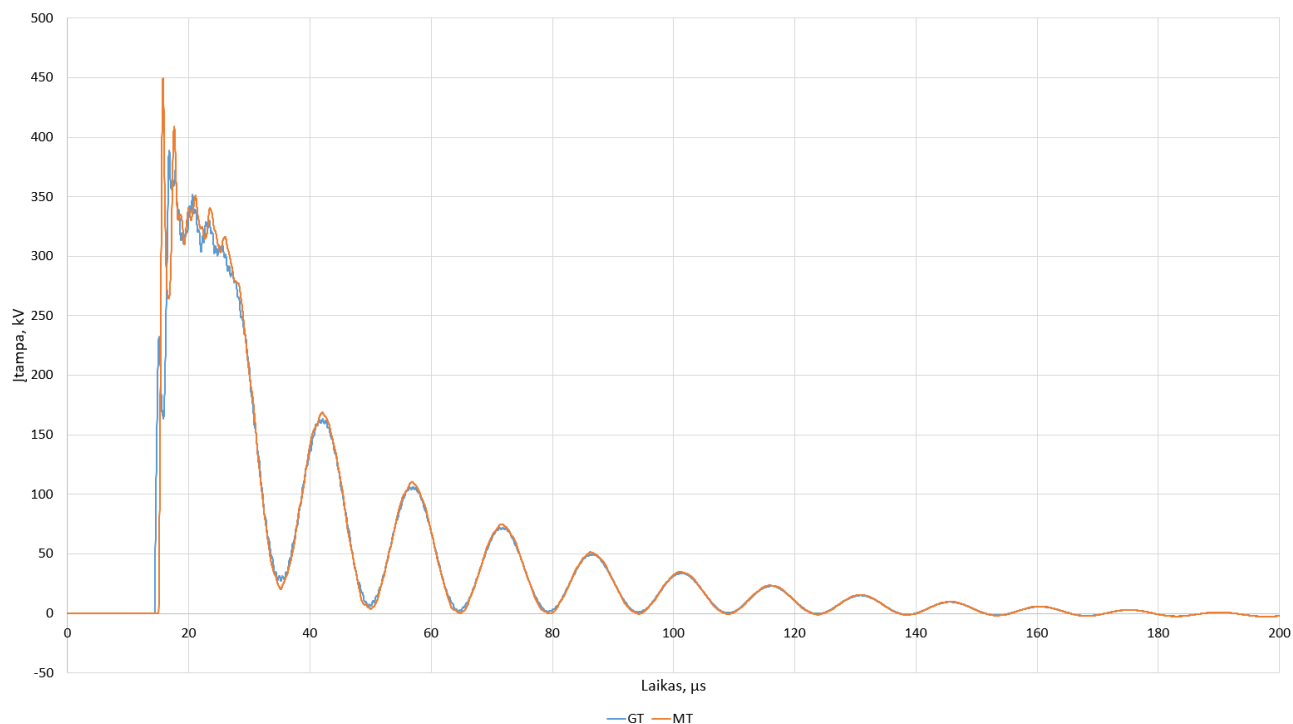


29 pav. 30 kA/1,2 μs žaibo impulsas skirstyklos įvade

9 lentelė. Maksimalių viršįtampių pasiskirstymas po 30 kA/1,2 μs žaibo impulso

Žaibo išlydžio vieta	Maksimali įtampa, kV							
	MT				GT			
Žaibo išlydžio vieta	A	I	T	I+T	A	I	T	I+T
Skirstyklos įvadas	1180.02	434.95	703.65	390.73	1230.22	501.13	458.35	340.40
50 m nuo skirstyklos	949.39	356.58	508.28	324.67	1107.99	402.13	368.52	314.74
100 m nuo skirstyklos	872.70	377.85	464.06	354.90	1017.55	412.52	356.90	323.90
350 m nuo skirstyklos	812.25	366.66	523.96	334.19	955.82	433.91	388.68	307.40
1200 m nuo skirstyklos	515.00	272.61	344.83	247.42	536.58	319.63	273.79	251.79
1250 m nuo skirstyklos	476.38	249.10	342.03	241.27	505.41	318.40	271.35	245.68

Didėjant žaibo impulsui iki 30 kA, viršįtampių reikšmės taip pat didėja. T konfigūracijos atveju skirstyklos viduje viršįtampiai už pirmojo III kl. ribotuvo prie MT siekia 703,65 kV, o prie GT – 458,35 kV. Efektyviausia ribotuvų konfigūracija išlieka I+T – šios konfigūracijos atveju reikšmės sumažinamos iki 245,68 kV transformatoriaus pusėje. Tai patvirtina, kad ribotuvų veiksmingumas priklauso nuo jų išdėstymo strategijos.

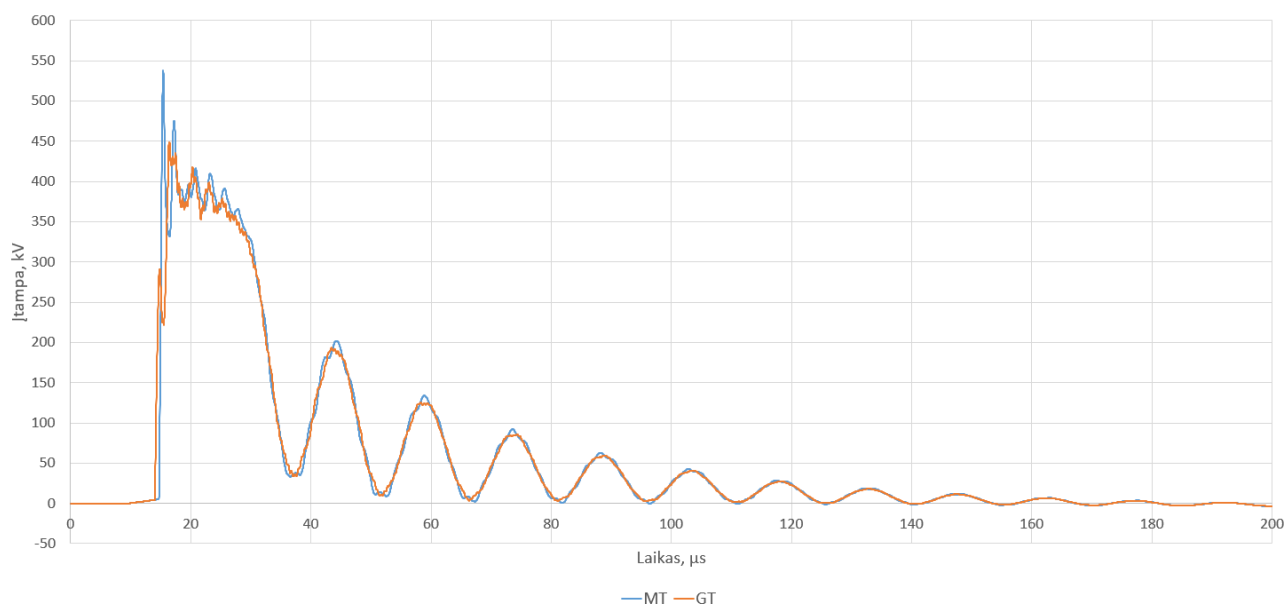


30 pav. 50 kA/1,2 μs žaibo impulsas skirstyklos įvade

10 lentelė. Maksimalių viršįtampių pasiskirstymas po 50 kA/1,2 μs žaibo impulso

Žaibo išlydžio vieta	Maksimali įtampa, kV							
	MT				GT			
	A	I	T	I+T	A	I	T	I+T
Skirstyklos įvadas	1174.89	433.06	700.59	389.03	1296.11	527.97	482.90	358.64
50 m nuo skirstyklos	945.26	355.03	506.07	323.26	1167.34	423.67	388.25	331.59
100 m nuo skirstyklos	868.91	376.21	462.04	353.36	1072.04	434.61	376.02	341.25
350 m nuo skirstyklos	808.71	365.06	521.68	332.74	1007.01	457.15	409.50	323.87
1200 m nuo skirstyklos	512.76	271.43	343.33	246.35	565.32	336.74	288.45	265.27
1250 m nuo skirstyklos	474.30	248.02	340.54	240.22	532.48	335.46	285.88	258.84

Žaibo impulsui pasiekus 50 kA, viršįtampių išmatuotos reikšmės tampa reikšmingos – prie GT kai viršįtampių ribotuvai neįrengiami viršijamas ir 1000 kV lygis. Pastebima, kad I konfigūracija su viršįtampių ribotuvais skirstyklos įvade yra efektyvesnė aukštesnių impulsų atveju, lyginant su T konfigūracija. Papildoma apsauga transformatoriaus terminale. I+T konfigūracija reikšmingai mažina įtampas, todėl laikytina optimalia saugumo požiūriu.



31 pav. 100 kA/1,2 μ s žaibo impulsas skirstyklos įvade

11 lentelė. Maksimalių viršįtampių pasiskirstymas po 100 kA/1,2 μ s žaibo impulso

Žaibo išlydžio vieta	Maksimali įtampa, kV							
	MT				GT			
	A	I	T	I+T	A	I	T	I+T
Skirstyklos įvadas	1624.91	598.93	968.93	538.04	1294.61	527.36	482.35	358.22
50 m nuo skirstyklos	1307.32	491.02	699.91	447.08	1165.99	423.18	387.81	331.21
100 m nuo skirstyklos	1201.72	520.31	639.02	488.70	1070.81	434.11	375.59	340.86
350 m nuo skirstyklos	1118.47	504.89	721.50	460.18	1005.85	456.62	409.03	323.49
1200 m nuo skirstyklos	709.16	375.39	474.83	340.71	564.67	336.36	288.12	264.97
1250 m nuo skirstyklos	655.97	343.02	470.98	332.23	531.87	335.07	285.55	258.54

Iš 11 lentelės ir 31 pav. matyti, kad padidėjus žaibo impulso srovei iki 100 kA, viršįtampių amplitudės reikšmingai išauga. Didžiausia įtampa fiksuojama, kai žaibas pataiko į skirstyklos įvadą – T konfigūracijos atveju prie MT užfiksuota maksimali viršįtamčio reikšmė siekiant 968,93 kV, o prie GT – 1294,61 kV, kas žymiai viršija abiejų įrenginių izoliacijos atsparumą.

Efektyviausias apsaugos rezultatas pasiekiamas taikant I+T konfigūraciją, kai viršįtampių ribotuvai įrengiami tiek prie MT, tiek prie GT – tokiu atveju atitinkamos viršįtampių reikšmės sumažėja iki 538,04 kV (MT) ir 358,22 kV (GT). Ši konfigūracija užtikrina optimalią įtampos ribojimo charakteristiką net esant aukštos energijos žaibo smūgiams, taip pat leidžia efektyviai apsaugoti skirstyklos įrenginius nuo žalingų viršįtampių poveikio.

3.2. Tyrimas su II klasės viršįtampių ribotuvais

Modeliavimas atliekamas su II kl. viršįtampių ribotuvu ($U_r=102$ kV, $U_c=82$ kV) įrengtu įvade ir II kl. ribotuvu įrengtu prie galios transformatoriaus.

12 lentelė. Maksimalių viršįtampių pasiskirstymas po 20 kA/1,2 μ s žaibo impulso

Žaibo išlydžio vieta	Maksimali įtampa, kV							
	MT				GT			
	A	I	T	I+T	A	I	T	I+T
Skirstyklos įvadas	1169.42	513.80	697.33	460.63	1175.13	478.69	437.83	381.41
50 m nuo skirstyklos	940.86	420.38	503.72	379.54	1058.37	384.12	352.01	353.55
100 m nuo skirstyklos	864.86	441.67	459.89	414.85	971.97	394.04	340.92	362.30
350 m nuo skirstyklos	804.95	425.14	519.25	387.49	913.01	414.48	371.28	342.97
1200 m nuo skirstyklos	510.37	315.55	341.73	286.39	512.55	305.31	261.53	280.68
1250 m nuo skirstyklos	472.10	287.80	338.95	278.74	482.78	304.14	259.19	273.16

13 lentelė. Maksimalių viršįtampių pasiskirstymas po 30 kA/1,2 μ s žaibo impulso

Žaibo išlydžio vieta	Maksimali įtampa, kV							
	MT				GT			
	A	I	T	I+T	A	I	T	I+T
Skirstyklos įvadas	1180.02	518.46	703.65	464.81	1230.22	501.13	458.35	399.29
50 m nuo skirstyklos	949.39	424.19	508.28	382.99	1107.99	402.13	368.52	370.13
100 m nuo skirstyklos	872.70	445.68	464.06	418.61	1017.55	412.52	356.90	379.29
350 m nuo skirstyklos	812.25	428.99	523.96	391.00	955.82	433.91	388.68	359.05
1200 m nuo skirstyklos	515.00	318.41	344.83	288.99	536.58	319.63	273.79	293.84
1250 m nuo skirstyklos	476.38	290.41	342.03	281.27	505.41	318.40	271.35	285.97

14 lentelė. Maksimalių viršįtampių pasiskirstymas po 50 kA/1,2 μ s žaibo impulso

Žaibo išlydžio vieta	Maksimali įtampa, kV							
	MT				GT			
	A	I	T	I+T	A	I	T	I+T
Skirstyklos įvadas	1174.89	516.21	700.59	462.79	1296.11	527.97	482.90	420.68
50 m nuo skirstyklos	945.26	422.35	506.07	381.32	1167.34	423.67	388.25	389.95
100 m nuo skirstyklos	868.91	443.74	462.04	416.79	1072.04	434.61	376.02	399.61
350 m nuo skirstyklos	808.71	427.12	521.68	389.30	1007.01	457.15	409.50	378.28
1200 m nuo skirstyklos	512.76	317.03	343.33	287.73	565.32	336.74	288.45	309.58
1250 m nuo skirstyklos	474.30	289.14	340.54	280.05	532.48	335.46	285.88	301.29

15 lentelė. Maksimalių viršįtampių pasiskirstymas po 100 kA/1,2 μ s žaibo impulso,

Žaibo išlydžio vieta	Maksimali įtampa, kV							
	MT				GT			
	A	I	T	I+T	A	I	T	I+T
Skirstyklos įvadas	1624.91	713.93	968.93	640.05	1294.61	527.36	482.35	420.19
50 m nuo skirstyklos	1307.32	584.11	699.91	576.43	1165.99	423.18	387.81	389.50
100 m nuo skirstyklos	1201.72	613.70	639.02	538.42	1070.81	434.11	375.59	399.14
350 m nuo skirstyklos	1118.47	590.72	721.50	526.34	1005.85	456.62	409.03	377.84

Žaibo išlydžio vieta	Maksimali įtampa, kV							
	MT				GT			
	A	I	T	I+T	A	I	T	I+T
1200 m nuo skirstyklos	709.16	438.46	474.83	397.94	564.67	336.36	288.12	309.22
1250 m nuo skirstyklos	655.97	399.89	470.98	387.31	531.87	335.07	285.55	300.94

Remiantis 12–15 lentelėmis, kuriose pateikti modeliuoti rezultatai naudojant tik II klasės viršįtampių ribotuvus galima matyti, kad viršįtampių reikšmės šiek tiek didesnės nei naudojant III+II klasių ribotuvų kombinaciją. II klasės ribotuvai užtikrina mažesnę apsaugą nei III klasės ribotuvai, ypač esant dideliems žaibo impulsams (pvz., 100 kA). I+T konfigūracija išlieka efektyviausia ir šiuo atveju. Kaip ir ankstesnėje analizėje, kai ribotuvai įrengiami tiek prie matavimo, tiek prie galios transformatorių, pasiekiamos mažiausios viršįtampių reikšmės.

Esant didesnėms žaibo srovėms (≥ 50 kA), II klasės ribotuvų apsauga tampa nepakankama. Kai kuriais atvejais viršijamas tiek MT, tiek GT leistinas impulsinis įtampos lygis, o tai kelia grėsmę įrangos izoliacijai.

Lyginant su III+II klasių konfigūracija, II kl. ribotuvai yra mažiau efektyvūs mažinant viršįtampių amplitudes, ypač esant smūgiui į skirstyklos įvadą ar netoliese (iki 100 m). Tai leidžia daryti išvadą, kad vien II kl. ribotuvų naudojimas gali būti pakankamas tik mažesnės srovės žaibo impulsų atveju.

Išvados

1. Išnagrinėjus literatūros šaltinius nustatyta, kad žaibo viršįtampiai oro linijose ir skirstyklose yra itin stačių frontų elektromagnetiniai reiškiniai, kurių impulso trukmė siekia mikrosekundžių eilės laiką, o amplitudės gali viršyti keletą šimtų kilovoltų. Žaibo impulsas gali pasiekti skirstyklą net esant smūgiui už kelių šimtų metrų nuo jos. Didžiausią pavojų kelia staigus įtampos kilimas, kuris ne tolygiai pasiskirsto izoliacijos tūryje, o susikaupia jos kraštinėse srityse, sukeldamas lokalią perkrovą ir pramušimo riziką.
2. EMTP aplinkoje sukurtas 110 kV transformatorių pastotės, kuri prijungta prie oro linijos, žaibo išlydžio sukeltų viršįtampių amplitudžių tyrimo modelis. Jis leidžia įvertinti viršįtampių amplitudinių verčių priklausomybę nuo įžeminimo kontūrų varžų, atramų geometrijos, viršįtampių ribotuvų, jų parametrų ir įrengimo vietos.
3. Nustatyta, kad aukščiausios amplitudės viršįtampiai veikiantys 110 kV įtampos skirstyklos elektros įrenginių izoliaciją susidaro ant arčiausiai oro linijos esančių įrenginių izoliacijos. Dėl šios priežasties būtina įrengti viršįtampių ribotuvus linijų įvaduose.
4. Nustatyta, kad 110 kV skirstykloje, kai yra jautrių viršįtampių poveikiui įrenginių (srovės ar įtampos transformatoriai), linijų prijunginiuose turi būti parinkti III-čios energetinės iškvovos klasės viršįtampių ribotuvai. Jei oro linijų prijunginiuose yra įrengti III-čios energetinės iškvovos klasės viršįtampių ribotuvai, tokiu atveju prie galios transformatoriaus tinka II energetinės iškvovos klasės viršįtampių ribotuvai su $U_c - 78 \div 87$ kV bei $U_r - 96 \div 102$ kV.

Literatūros sąrašas

1. MARTINEZ-VELASCO J. A. ir F. CASTRO-ARANDA. Switching Overvoltages in Power Systems. Iš: Encyclopaedia of Life Support Systems (EOLSS), Power System Transients, Barcelona, Ispanija.
2. BAUBLYS J., P. JANKAUSKAS, L. A. MARKEVIČIUS, A. MORKVĖNAS. Izoliacija ir viršįtampiai: vadovėlis. Kaunas: Technologija, 2008. ISBN 978-9955-25-472-0
3. SHABAN M. Metal Oxide Surge Arrester: A Tool for Lightning Stroke Analysis [interaktyvus]. 2021, [žiūrėta 2025-03-01]. Prieiga per:10.1109/IEMTRONICS52119.2021.9422626
4. FONT A., S. ILHAN, A. ÖZDEMİR. Line Surge Arrester Application for a 380 kV Power Transmission Line [interaktyvus]. 2016, [žiūrėta 2025-03-01]. Prieiga per:10.1109/ICHVE.2016.7800722
5. HOSSEINI S. A., M. MIRZAIE, T. BARFOROSHI. Impact of surge arrester number and placement on reliability and lightning overvoltage level in high voltage substations [interaktyvus]. 2015, [žiūrėta 2025-03-01]. Prieiga per:<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.09.037>
6. DWIVEDI S., A. S. KHOPKAR, H. TAILOR. Optimal Location of Surge Arrester for Protection of 220kV Transmission Line Against Lightning Over Voltages Using EMTP-RV Software [interaktyvus]. 2025, [žiūrėta 2025-05-01]. Prieiga per:10.47191/etj/v10i01.14, I.F. – 8.227
7. FULCHIRON D. Overvoltages and insulation coordination in MV and HV. Iš: Cahier Technique Merlin Gerin n° 151, 1995.
8. BANDEL J., A. HEJDUK, A. DZIERŲSKI, P. KORYCKI, H. SIBILSKI Switching and Lightning Overvoltages and the Required Withstand Voltage Between the Open Contacts of 245 kV Circuit Breakers [interaktyvus]. 2016, [žiūrėta 2025-03-01]. Prieiga per:10.5604/01.3001.0009.4410
9. SUBEDI D. Lightning Induced Over-voltages in Power Transformer and Voltage Spikes in Connected Load. Aalto University, School of Electrical Engineering, 2017
10. BORGHETTI A., A. MORCHED, F. NAPOLITANO, C. A. NUCCI, M. PALONE. Lightning-Induced Overvoltages Transferred Through Distribution Power Transformers [interaktyvus]. 2008, [žiūrėta 2025-03-01]. Prieiga per:10.1109/TPWRD.2008.2002674
11. VASSILEVA M., N. VELIKOVA, N. NIKOLAEV. Model Study of Lightning Protection of 110 kV Substation [interaktyvus]. 2014, [žiūrėta 2025-03-01]. Prieiga per:10.1109/EEEIC.2014.6835847
12. BEDOUI S., A. BAYADI, A. HADDAD. Analysis of lightning protection with transmission line arrester using ATP/EMTP: Case of an HV 220kV double circuit line. Iš: 45th International Universities Power Engineering Conference UPEC2010, Cardiff, UK, 2010, pp. 1-6.
13. STANCHEV D. Assessment the energy capability of surge arresters in substation 220 kV [interaktyvus]. 2020, [žiūrėta 2025-03-01]. Prieiga per:10.1109/BulEF48056.2019.9030749
14. MALELAK M. A. ir R. ZORO. Lightning protection system for high voltage transmission line in area with high grounding resistance [interaktyvus]. 2017, [žiūrėta 2025-03-01]. Prieiga per:10.1109/ICHVEPS.2017.8225869
15. IEEE. Standard for Insulation Coordination--Definitions, Principles, and Rules. Std C62.82.1-2010, 2011
16. IEEE. Recommended Practice for Electric Power Distribution for , Plants, Std 141-1993, [interaktyvus]. 1994, [žiūrėta 2025-03-01]. Prieiga per:10.1109/IEEESTD.1994.121642

17. IEEE. Standard for High-Voltage Testing Techniques - Redline, Std 4-2013, 2013
18. ISLAM M. Z., M. R. RASHED, M. S. U. YUSUF. ATP-EMTP modeling and performance test of different type lightning arrester on 132kv overhead transmission tower [interaktyvus]. 2017, [žiūrėta 2025-03-01]. Prieiga per:10.1109/EICT.2017.8275172
19. LITGRID AB. Apibendrinti reikalavimai viršįtampių ribotuvų rengimui 110 kV transformatorių pastotėse, Nr. 21NU-191, 2021.
20. RUZGYS B. ir G. BUBULIS. Viršįtampių ribotuvų parinkimo rekomendacijos, Vilnius: SKDB, 1999, 36 p.
21. MEISTER A., R. A. SHYANI, M. A. de OLIVERIA. Comparison of metal oxide surge arrester models in overvoltage studies. [interaktyvus]. 2011, [žiūrėta 2025-03-01]. Prieiga per:<http://dx.doi.org/10.4314/ijest.v3i11.4S>
22. IEEE. Application of Surge Protective Devices Committee. Modeling of metal oxide surge arresters [interaktyvus]. 1992, [žiūrėta 2025-03-01]. Prieiga per:10.1109/61.108922
23. LITGRID AB. Perdavimo tinklo 110 kV OL tipinių tarpinių atramų projektas. 110 kV įtampos viengrandė tarpinė atrama (I variantas), Nr. 21NU-475, 2021.